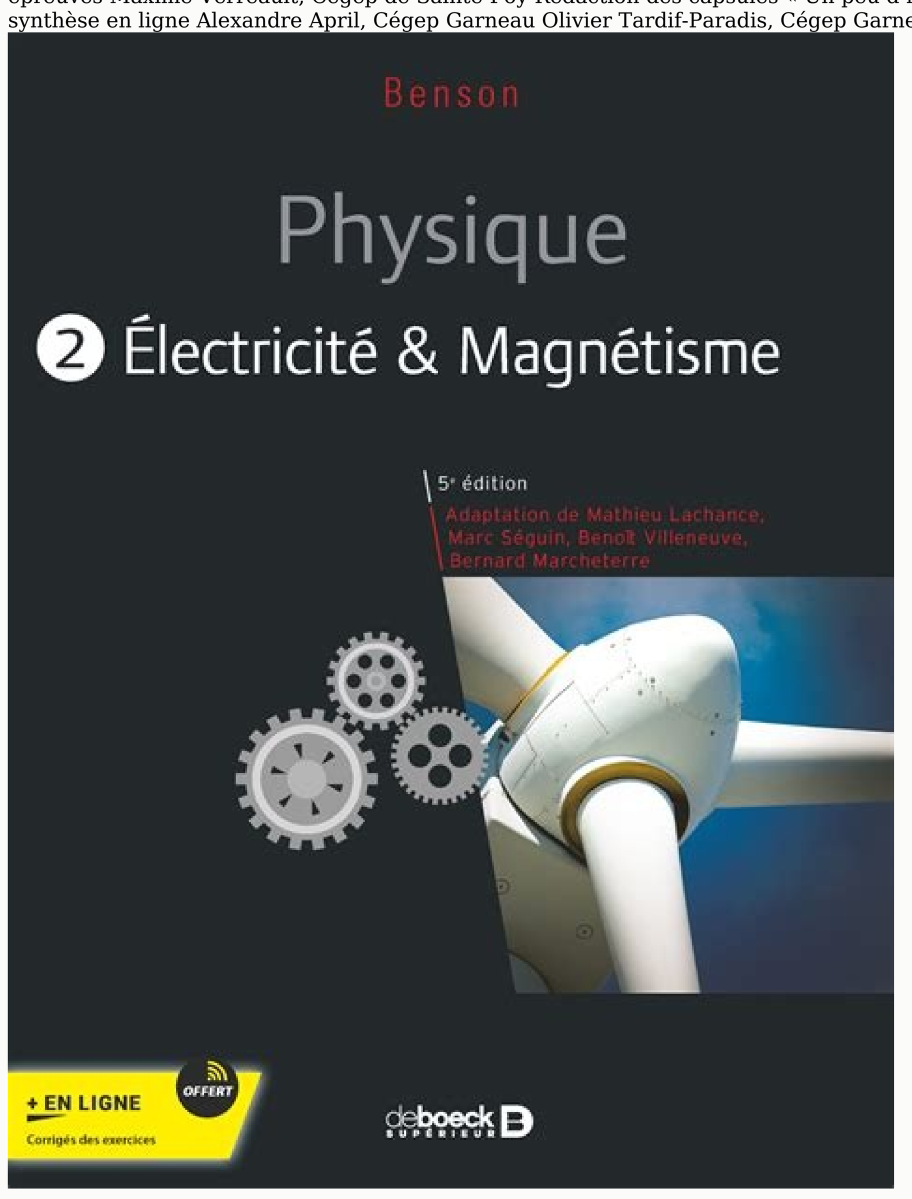
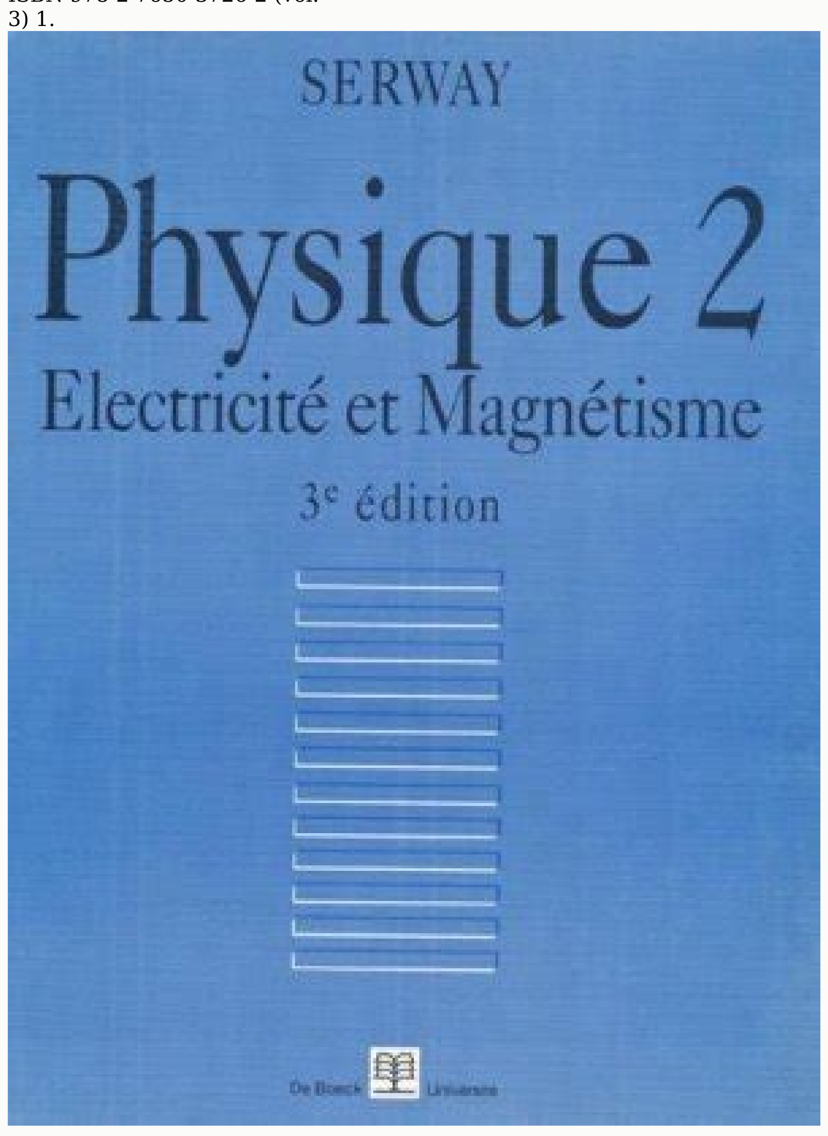
Physique 2 electricite et magnetisme pdf

Want more? Advanced embedding details, examples, and help! Want more? Advanced embedding details, examples, and help! Ph sique ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME 2 René Lafrance Avec la collaboration de Jean Parent 2 Ph sique ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME René Lafrance Avec la collaboration de Jean Parent Révision scienti═que des épreuves Maxime Verreault, Cégep de Sainte-Foy Rédaction des capsules « Un peu d'histoire » Jean-Louis Trudel, CIRST et Université d'Ottawa Rédaction des exercices et des solutionnaires en ligne Geneviève Caron, Collège Montmorency Rédaction des dé═s animés en ligne Jean Parent, Collège de Bois-de-Boulogne Rédaction des problèmes synthèse en ligne Alexandre April, Cégep Garneau Olivier Tardif-Paradis, Cégep Garneau Physique 2 Électricité et magnétisme Le matériel complémentaire mis en ligne dans notre site Web est réservé aux résidants du Canada, et ce, à des fins d'enseignement uniquement.



René Lafrance © 2014 TC Média Livres Inc. Conception éditoriale : Sophie Gagnon Édition : Martine Rhéaume et Marie Victoire Martin Coordination : Jean-Pascal Baillie, Célia Chalfoun et Alexandra Soyeux Recherche iconographique : Julie Saindon Révision linguistique : Ginette Laliberté Correction d'épreuves : Marie Le Toullec et Zérofôte Conception graphique : Pige Communication Illustrations : Bertrand Lachance et Michel Rouleau Conception de la couverture : Micheline Roy Impression : TC Imprimeries Transcontinental Coordination éditoriale du matériel complémentaire Web : Martine Rhéaume Coordination du matériel complémentaire Web : Célia Chalfoun Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives nationales du Québec et Bibliothèque et Archives Canada Lafrance, René, 1968Physique Comprend un index. Sommaire : 1. Mécanique – 2. Électricité et magnétisme – 3. Ondes, optique et physique moderne. Pour les étudiants du niveau collégial. ISBN 978-2-7650-3357-8 (vol. 1) ISBN 978-2-7650-3546-6 (vol. 2) ISBN 978-2-7650-3726-2 (vol.
3) 1.



Physique – Manuels d'enseignement supérieur. i. Lafrance, René, 1968. Mécanique. ii. Lafrance, René, 1968.
Électricité et magnétisme. iii. Lafrance, René, 1968. Ondes, optique et physique moderne. i. Titre. ii. Titre : Mécanique. iii. Titre : Électricité et magnétisme. iv. Titre : Ondes, optique et physique moderne. QC21.3.L33 2014 530 C2014-940299-6 ISBN 978-2-7650-3546-6 Dépôt légal : 1er trimestre 2014 Bibliothèque et Archives nationales du Québec Bibliothèque et Archives Canada Imprimé au Canada 2 3 4 5 6 ITIB 22 21 20 19 18 Gouvernement du Québec – Programme de crédit d'impôt pour l'édition de livres – Gestion SODEC. L'achat en ligne est réservé aux résidants du Canada. Avant-propos Mon but, en écrivant cette collection de manuels de physique, a été d'obtenir un texte scientifique à la fois accessible et rigoureux. J'ai donc utilisé un style simple, avec des explications concises et précises, et de nombreux schémas et encadrés pour bien faire ressortir les résultats importants. Les concepts sont expliqués un à la fois, et les exemples sont placés immédiatement après ces explications. La physique repose sur quelques principes de base qui sont ensuite généralisés à des situations complexes. Pour cette raison, j'emploie une méthode par intégration. La théorie est bâtie graduellement à partir de notions déjà vues en utilisant une suite logique. De même, on mentionne au lecteur que des notions déjà abordées sont reprises plus loin dans le manuel. La méthode par intégration permet d'établir les liens entre les concepts, tout en revenant sur les notions déjà vues. Le texte et les équations mathématiques suivent une formulation rigoureuse. Les explications reposent sur une notation mathématique intuitive et complète. Les quantités scalaires et les quantités vectorielles sont bien différenciées, autant dans le texte que dans les équations.

Les vecteurs sont toujours exprimés à l'aide de vecteurs unitaires adaptés à la situation (vecteurs cartésiens, vecteurs polaires pour le mouvement de rotation, vecteurs textuels comme vers la droite). La physique est aussi une discipline idéale pour développer une méthode de résolution de problèmes. Je suis conscient qu'il n'existe pas une méthode universelle pour résoudre tous les problèmes. Par contre, je trouve important qu'un étudiant puisse avoir un modèle, pour ensuite développer sa propre stratégie, selon le type de problème. Bien des étudiants arrivant du secondaire ont l'impression que les problèmes de physique se résolvent « quand on connaît la bonne formule ».

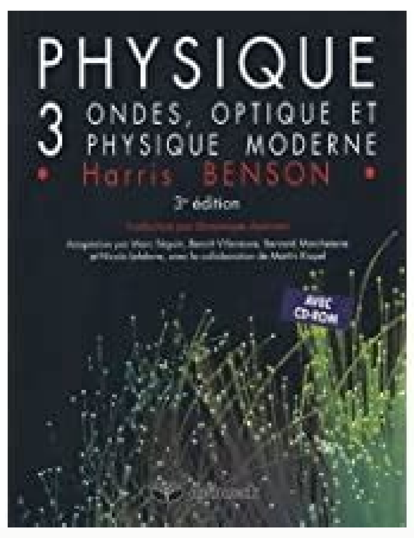
Pour contrer cela, je mets d'abord l'accent sur l'analyse qualitative, par l'entremise d'un schéma ou d'un diagramme. La stratégie de résolution ne se termine pas avec la réponse, mais par la validation, c'est-à-dire par un jugement critique porté sur le résultat. Le tome 2 de cet ouvrage porte sur l'électricité et le magnétisme. Le but premier est la compréhension des phénomènes électriques et magnétiques à partir du concept de champ. Pour cette raison, je porte beaucoup d'attention à l'interaction exercée par les champs électrique et magnétique sur les particules chargées. J'utilise une approche vectorielle pour représenter et calculer les champs. Cette méthode peut sembler plus complexe qu'une méthode scalaire, mais elle est plus rigoureuse et simplifie grandement le calcul des intégrales, aucun changement de variable n'étant requis. Le calcul d'une intégrale se résume alors à regarder la solution dans une table. Dans l'étude des circuits, les formules particulières sont obtenues à partir des lois générales de Kirchhoff. IV Avant-propos Remerciements Je tiens d'abord à remercier Jean-François Bojanowski, qui m'a invité avec un groupe de professeurs de physique à réfléchir au projet de publication d'une collection de livres de physique. Je remercie les membres de ce groupe : Yves Carbonneau, André De Bellefeuille, Alexandre Fortier, Jean Parent, ainsi que Pierre Lafleur pour sa participation. Dans ce groupe, nous avons réfléchi et échangé des idées sur ce que devrait contenir un bon manuel de physique pour l'enseignement collégial. La structure de la collection est le résultat de ces discussions. Parmi ce groupe d'enseignants, je remercie particulièrement André De Bellefeuille pour m'avoir encouragé à commencer l'écriture du livre de mécanique, et pour avoir révisé les premiers chapitres. J'ai profité de discussions avec un grand nombre de collègues physiciens enseignants durant ma carrière, particulièrement Jacques Bridet, Tommaso Donato, Daniel Fortier, Olivier Major, Normand Painchaud, Donald Pelletier, Julie Quenneville et Vincent Stelluti. Je remercie aussi grandement mes collègues du Collège de Bois-de-Boulogne qui ont utilisé et commenté des versions préliminaires de l'ouvrage : Adama Diallo, Merlin Delaval-Lebel, Christian Gervais, Oliver Langlois, Jonathan Laverdière, Alexandre Lemerle et Martin Périard.

Je remercie aussi les étudiants qui ont fait des commentaires et des suggestions sur les versions préliminaires et qui ont permis d'améliorer cette collection. De plus, je tiens à remercier particulièrement mes collègues Delphine Quievy et Marie-Josée Lim pour leurs commentaires et leurs encouragements continus. Finalement, ce travail n'aurait pas été possible sans la rétroaction constante de mon collaborateur Jean Parent, qui a été présent dès le début du projet. Je remercie Sophie Gagnon, éditrice conceptrice chez Chenelière Éducation, qui a cru à ce projet très rapidement et qui a permis que cette collection voie le jour. Je veux la remercier pour tous ses efforts. Je remercie aussi Marie Victoire Martin qui a travaillé au début du travail d'édition et Martine Rhéaume qui a pris le relais avec brio, ainsi que toute son équipe de coordination éditoriale, dirigée par Dominique Lefort et assurée par Jean-Pascal Baillie, Alexandra Soyeux et Célia Chalfoun. Plusieurs personnes se sont greffées à la réalisation du projet final. Je veux remercier Mohammed-Hedi Boukhatem, Yves Carbonneau, Geneviève Caron, Sophie Descoteaux, Richard Haince, Jean Lacombe et Guillaume Trudel qui ont évalué les versions préliminaires et qui ont fait des suggestions pour améliorer le texte. Merci à Jean-Louis Trudel pour la rédaction des rubriques historiques. Je remercie également Geneviève Caron et Maxime Verreault pour leur collaboration dans la révision, les exercices et les solutionnaires. Je remercie aussi François Vervaet, Michel Bisson-Viens, Alexandre April et Oliver TardifParadis pour avoir collaboré à l'élaboration du matériel complémentaire. Pour terminer, j'ai travaillé plusieurs années sur ce projet. La réalisation de ce dernier n'a été possible qu'avec le soutien de ma famille.

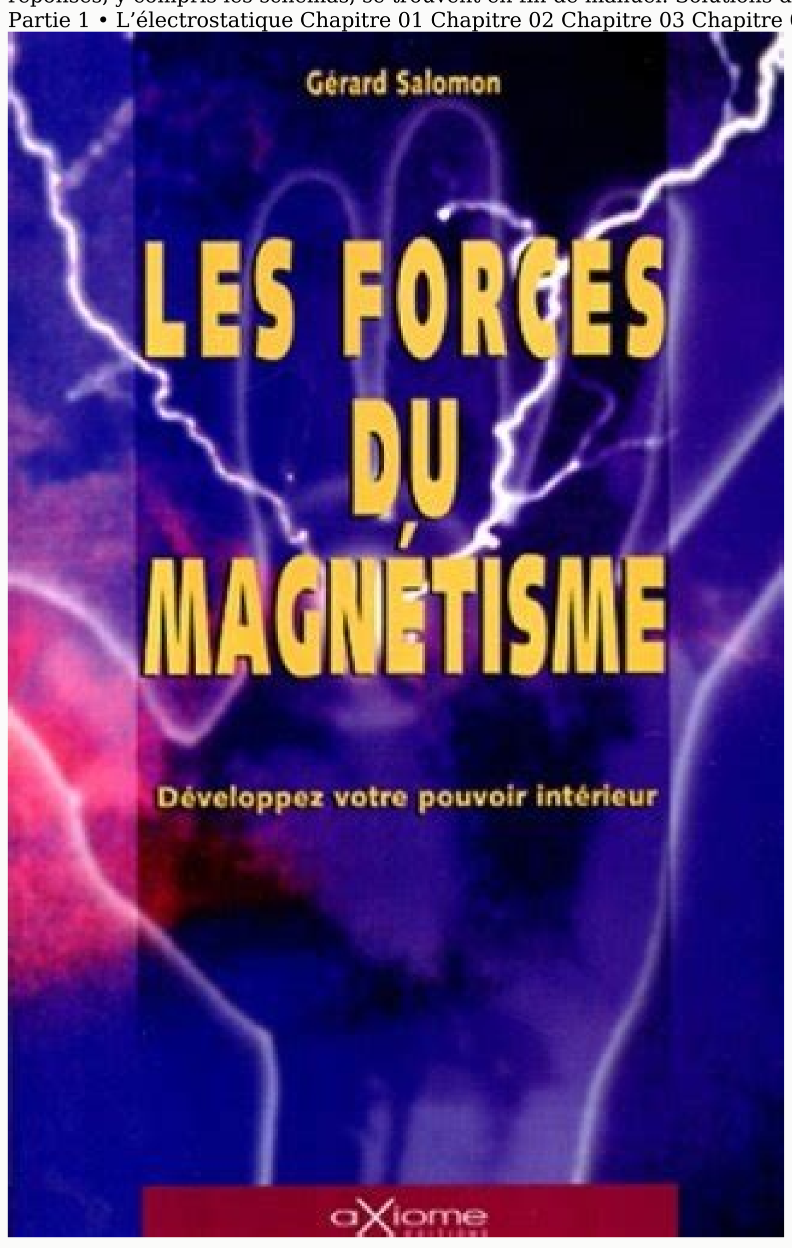
Je tiens à dire un gros merci à mes filles Angélique, Marie, Geneviève et Charlotte, qui ont accepté d'avoir un papa qui travaille tout le temps, et qui ont donné de leur temps pour prendre des photos et faire des commentaires sur des versions préliminaires. Finalement, mon épouse Catherine Bergeron a été essentielle, pour son soutien moral et grammatical. Sans toi Catherine, il n'y aurait que du papier blanc. Merci de tout cœur. Présentation du manuel Ouverture de chapitre Une photographie accompagnée d'une légende illustre une situation que la matière du chapitre permet d'expliquer. Buts du chapitre Les buts du chapitre indiquent clairement les objectifs d'apprentissage visés. Ils facilitent le premier contact avec la matière et la révision. Préalables Les préalables précisent quelles notions doivent être maîtrisées ou révisées afin de pouvoir comprendre la matière et d'atteindre les objectifs d'apprentissage. Ainsi, le lecteur peut rapidement mettre à jour ses connaissances et établir des liens entre les notions.

Rubriques Stratégie La rubrique Stratégie expose et précise la stratégie de résolution de problème qui est utilisée dans tous les exemples résolus. Elle présente au lecteur une approche systématique de la résolution de problème qui favorise son autonomie. Technique La rubrique Technique présente l'explication de certaines tâches précises, qui sont ensuite illustrées dans un exemple.

Elle permet de préciser certaines étapes de la stratégie de résolution de problème dans des contextes particuliers. VI Présentation du manuel Exemple Dans chaque exemple, présenté en détail, la stratégie de résolution de problème est utilisée. Les exemples sont souvent illustrés de façon réaliste et de façon schématique. Figures réalistes et figures schématiques Des figures réalistes permettent au lecteur d'ancrer la situation dans le concret, tandis que les figures schématiques permettent de poursuivre la résolution de problème en tenant compte de l'essentiel. Lorsque c'est nécessaire, certaines figures contiennent des annotations qui viennent compléter l'explication de la légende. Remarques et mises en garde Aux endroits appropriés, des remarques sont ajoutées afin de fournir une information complémentaire, alors que des mises en garde préviennent des erreurs courantes.



Formules et définitions Formules encadrées Les équations essentielles sont encadrées afin d'attirer l'attention du lecteur.
Définitions Des termes en marge sont définis dans des encadrés, à l'aide de mots ou d'équations, annonçant au lecteur un terme important.
Présentation du manuel Tableaux et encadrés Tableaux Des tableaux mettent en relation certaines données dont le lecteur pourra se servir pour résoudre les problèmes. Encadrés Les résultats importants et les limites des modèles et des approximations sont mis en relief dans des encadrés colorés. Résumé Les résumés de fin de chapitre, sur une seule page, constituent une synthèse de la matière. Les concepts importants du chapitre y sont repris de façon succincte et sont regroupés par types ; ils s'avèrent des outils de compréhension et de révision très utiles.
Un peu d'histoire Une capsule historique est présentée au début de quatre chapitres. Elle met en évidence les contextes de certaines découvertes et souligne l'importance de la contribution de personnalités de la physique. VII VIII Présentation du manuel Exercices de niveaux variés Chaque chapitre contient plusieurs exercices de niveaux variés, qui couvrent l'ensemble de la matière. En voici les différents types : Testez votre compréhension Ces questions qualitatives simples sont insérées à des endroits opportuns dans les chapitres ; elles permettent de tester la compréhension des notions qui viennent tout juste d'être vues. Solutions aux tests de compréhension Les solutions aux tests de compréhension sont disponibles à la fin de chaque chapitre. Le lecteur peut donc évaluer sa compréhension lui-même et revenir sur les notions moins bien maîtrisées, au besoin. Défis animés On trouve parfois en marge une question en lien avec la matière. Pour y répondre, l'étudiant est appelé à se rendre sur interactif pour réaliser la manipulation nécessaire. Il s'agit d'une manipulation dirigée des simulations interactives de l'Université de Boulder au Colorado. Questions, exercices et problèmes À la fin des chapitres, les exercices sont divisés en quatre niveaux de difficulté : les questions qualitatives (Q), les exercices simples (E), les problèmes (P) et les problèmes récapitulatifs (R). Les réponses, y compris les schémas, se trouvent en fin de manuel. Solutions disponibles à l'étudiant Pour certaines questions et certains exercices et problèmes, les solutions complètes et détaillées sont disponibles pour l'étudiant sur interactif. Elles reprennent la démarche de résolution de problème utilisée dans tout le manuel. Table des matières



 Chapitre 2 La charge électrique Buts du chapitre Ce chapitre aborde l'électrostatique en s'intéressant d'abord à la charge électrique. Après l'étude de ce chapitre, vous serez en mesure : • de connaître les propriétés de la charge électrique ; • de comprendre qualitativement le comportement des conducteurs et des isolants ; • de calculer la force électrique exercée entre des particules chargées. Préalables Ce chapitre porte sur la façon de calculer la force électrique, qui est une quantité vectorielle.

Revoyez : • les vecteurs et l'algèbre vectorielle, étudiés aux sections 2.1 et 2.3 du tome 1 ; • la stratégie de résolution de problèmes, présentée à la section 1.8 du tome 1. 3 Après avoir frotté le ballon sur les cheveux, il y a une attraction électrique entre les cheveux et le ballon.

4 CHAPITRE 01 — La charge électrique UN PEU D'HISTOIRE L'exceptionnelle précision de Coulomb La conquête anglaise du Canada aura permis à CharlesAugustin Coulomb de décrocher sa première mission importante comme ingénieur. Quand les Britanniques décident de conserver la Nouvelle-France, acquise de haute lutte, ils laissent aux Français quelques îles des Antilles, dont la Martinique. Pour assurer la défense de ces colonies entourées d'ennemis, le roi de France envoie Coulomb superviser le renforcement des fortifications. Le jeune ingénieur passe ainsi huit années loin des siens. Membre d'une nouvelle génération d'ingénieurs initiés aux pratiques scientifiques, il accumule les observations et les expériences. À son retour au pays, il soumet plusieurs rapports à l'Académie royale des sciences. En 1777, l'Académie crée un prix pour l'amélioration des boussoles et l'explication des variations quotidiennes du champ magnétique terrestre. Le sujet intéresse naturellement Coulomb.

La boussole est un outil de travail essentiel pour l'arpentage ou l'orientation des édifices. En traversant l'Atlantique, Coulomb a également pu en apprécier l'importance pour la navigation. Coulomb remplace d'abord l'aiguille traditionnelle posée sur un pivot par une aiguille aimantée suspendue à un fil de soie. Il a étudié les propriétés mécaniques de la soie et a établi que celle-ci ne s'opposera pas aux faibles forces engendrées par les fluctuations du champ magnétique. Ce qu'il a oublié, c'est que la soie est un isolant. Pour éliminer l'influence de l'électricité statique qui perturbe les mouvements de l'aiguille, il faut une mise à la terre. Coulomb utilise donc un fil métallique et découvre que le moment de force est proportionnel à l'angle de torsion.

Il Charles-Augustin de Coulomb, 1736-1806 en tire la balance à torsion, d'une sensibilité sans précédent, et s'en servira pour mesurer la force de l'électricité. Qu'est-ce que l'électricité ? Au 18e siècle, personne ne connaît la réponse à cette question. L'électricité partage des caractéristiques déroutantes avec le magnétisme et la chaleur. Invisible et impalpable, elle a aussi un poids indétectable. Les savants la comparent à un fluide capable de couler d'un corps à un autre. L'invention de la bouteille de Leyde, en 1745, part de l'idée qu'on pourrait accumuler l'électricité dans un récipient fermé pour réduire son « évaporation », c'est-à-dire la perte progressive de l'électrisation des corps chargés par friction. C'est le premier condensateur. Parfois, les substances électrisées s'attirent. Parfois, elles se repoussent. Les savants anglais croient que l'électricité se compose d'un fluide unique, tandis que les savants français soutiennent qu'il s'agit de deux fluides différents. À l'époque de Coulomb, la plupart des expériences sur l'électricité restent qualitatives. Presque personne n'a fait passer l'électricité dans la catégorie des phénomènes mesurables, mais plusieurs résultats indiquent que l'attraction des corps chargés s'exerce de la même manière que l'attraction gravitationnelle.

En 1785, la balance à torsion de Coulomb révèle que la répulsion entre les charges électriques varie bel et bien selon l'inverse du carré des distances. Avec un instrument moins précis, un pendule à torsion muni d'un fil de soie, le savant complète la démonstration en obtenant une attraction selon l'inverse du carré des distances. Les mesures de Coulomb semblent trop exactes pour être vraies. Hors de la France, ses contemporains sont sceptiques. Plusieurs historiens ont depuis tenté de reproduire ses expériences, sans grand succès. Les résultats dépendent si étroitement des matériaux employés et de la procédure suivie que certains le soupçonnent d'avoir sélectionné l'appareillage qui donnerait les résultats recherchés. En fait, peu d'expérimentateurs modernes ont mis le même soin à maîtriser toutes les conditions de l'expérience, substituant du plastique à la cire d'époque, par exemple. Coulomb a consacré des mois à l'étude des matériaux, à la mesure de petites forces et au perfectionnement de sa balance. La récompense de ses multiples expériences, c'est qu'il peut affirmer avec confiance qu'il a déterminé les lois gouvernant les forces électrique et magnétique. Et qu'il a raison. 1.1 — Quelques expériences simples 5 La force électrique est une force à distance exercée sur les objets ayant une charge électrique. Dans ce chapitre, nous allons étudier les propriétés de la charge électrique.

À l'aide du modèle atomique, nous verrons d'où vient la charge lorsqu'on frotte deux objets ensemble. Nous allons aussi distinguer les isolants des conducteurs. Ces deux types d'objets ont des propriétés différentes. Nous verrons aussi que lorsque les objets sont petits par rapport à la distance qui les sépare, la force peut être calculée simplement à l'aide d'une relation qui a la même forme que la loi de la gravitation universelle de Newton. L'étude que nous faisons dans ce chapitre est une première étape dans l'étude de la force électrique.

Dans les prochains chapitres, nous allons construire graduellement la théorie de l'électromagnétisme qui nous mènera vers une meilleure compréhension du monde qui nous entoure et des applications multiples de l'électricité dans la vie de tous les jours et dans les domaines scientifiques. On amorce l'étude de l'interaction électromagnétique par de simples expériences comme celle où on frotte un ballon de fête contre des cheveux. Comme le montre la photo de l'ouverture du chapitre, il y a alors une force entre les cheveux et le ballon. Il est aussi possible de placer le ballon contre un mur et de le lâcher. Si le ballon a été suffisamment frotté contre les cheveux, il pourra rester en équilibre. Ce phénomène a été observé plusieurs siècles avant Jésus-Christ : on avait remarqué que des morceaux d'ambre, une résine fossilisée qu'on peut voir à la figure 1.1, attiraient de petits morceaux de paille après avoir été frottés vigoureusement avec un vêtement. D'ailleurs, le mot électricité est un dérivé du mot ambre (ηλ κτ ρον) en grec. 1.1 Quelques expériences simples Par une journée où l'air était sec, vous avez probablement déjà ressenti une sensation désagréable en touchant une poignée de porte en métal. En frottant vos pieds sur un plancher recouvert d'un tapis, vous avez accumulé une charge électrique. Lorsque vous avez touché la poignée de porte, cette charge s'est déplacée rapidement en vous donnant un choc électrique. Pour connaître les propriétés de la charge électrique, on peut mener quelques expériences élémentaires à l'aide de tiges de plastique, de verre et de métal munies d'une poignée de bois. On a aussi besoin de morceaux de laine et de soie ainsi que de la ficelle. Expérience 1 : On approche une tige de plastique d'une autre tige de plastique suspendue. Les tiges n'ont été frottées ni avec de la laine ni avec de la soie. Les tiges restent immobiles. Il n'y a donc aucune force entre les deux tiges. On dit que les tiges sont neutres. Expérience 2 : On frotte deux tiges de plastique avec de la laine. Lorsqu'on approche la première tige de la tige suspendue, il y a une répulsion entre les tiges. FIGURE 1.1 L'ambre peut être chargé par frottement avec de la laine. 6 CHAPITRE 01 — La charge électrique Expérience 3 : On frotte deux tiges de verre avec de la soie. Lorsqu'on approche la première tige de la tige suspendue, il y a une répulsion entre les tiges. Expérience 4 : On frotte une tige de verre avec de la soie et une tige de plastique avec de la laine. On suspend la tige de plastique. Lorsqu'on approche la tige de verre, il y a une attraction entre les tiges. Expérience 5 : On frotte une tige de verre avec de la soie et une tige de plastique avec de la laine. On suspend la tige de plastique entre les deux matières. La tige de plastique est attirée par la laine utilisée pour charger la tige. De plus, la tige est repoussée par la soie ayant servi à charger la tige de verre. Dans ces expériences, le module de la force est plus grand lorsqu'on diminue la distance entre les tiges ou lorsqu'on frotte plus longtemps les tiges. Ces expériences montrent que les tiges acquièrent respectivement une charge électrique nette lorsqu'on les frotte avec de la laine ou de la soie. Elles démontrent aussi que les objets chargés exercent l'un sur l'autre une force à distance qu'on appelle la force électrique.

Cette force est soit attractive (voir l'expérience 4), soit répulsive (voir les expériences 2 et 3). L'expérience 5 prouve que la laine devient aussi chargée après avoir été frottée sur le plastique. La laine se comporte comme la tige de verre et attire la tige de plastique. De plus, la soie ayant servi à charger une tige de verre repousse la tige de plastique. Elle se comporte comme le plastique. On peut électriser d'autres objets par frottement.

Ces derniers se comportent alors comme la tige de verre ou comme la tige de plastique.

Ceci montre qu'il y a deux types de charge : celle qui est portée par la tige de verre et celle qui est portée par la tige de plastique. Jusqu'au 18e siècle, on emploie les expressions électricité vitreuse pour décrire la charge portée par la tige de verre et électricité résineuse pour la charge portée par le plastique, car à cette époque, on utilise plutôt de l'ambre, qui se comporte comme le plastique. C'est le physicien américain Benjamin Franklin (1706-1790) qui énonce la convention utilisée aujourd'hui : la charge de la tige de verre frottée avec de la soie est positive, et celle de la tige de plastique frottée avec de la laine est négative. Lorsqu'on frotte le verre avec de la soie, le verre devient chargé positivement et la soie devient chargée négativement. De même, si on frotte du plastique avec de la laine, le plastique devient chargé négativement et la laine devient chargée positivement. 1.2 — Les propriétés de la charge électrique 7 L'analyse de ces expérience nous apprend ce qui suit. Les objets chargés exercent les uns sur les autres une force à distance appelée la force électrique. Cette force a les propriétés suivantes : • La force est attractive lorsque les charges sont opposées (un objet chargé positivement et un objet chargé négativement), et elle est répulsive lorsque les charges ont le même signe (deux objets chargés positivement ou deux objets chargés négativement). • Le module de la force diminue lorsque la distance entre les charges augmente. 1.2 Les propriétés de la charge électrique La découverte des propriétés de l'atome faite durant la première moitié du 20e siècle a permis de comprendre l'origine de l'électricité. Ces propriétés seront expliquées dans le tome 3. Pour l'instant, on utilise un modèle rudimentaire pour interpréter les résultats obtenus dans les expériences de la section précédente.

L'atome est composé d'un noyau massif et compact (de l'ordre de 10−14 m) entouré d'électrons (voir la figure 1.2). Le noyau est constitué de protons et de neutrons. Les électrons n'ont pas de trajectoires bien définies, mais ils forment un nuage électronique dont le diamètre est de l'ordre de 10−10 m. FIGURE 1.2 L'atome est constitué d'un noyau compact et d'un nuage électronique. La quantification de la charge Les particules ont des propriétés intrinsèques : chaque particule a une masse bien définie et une charge électrique (voir le tableau 1.1). Le neutron est neutre, il n'a pas de charge électrique. Selon la convention de Franklin, le proton a une charge positive et l'électron, une charge négative. On a déterminé, grâce à des mesures très précises, que le proton et l'électron ont des charges opposées, dont la valeur absolue est égale. La charge du proton est appelée la charge élémentaire, et elle est représentée par e. La charge de l'électron est alors −e. Dans le SI, la charge se mesure en coulombs (C) (nous verrons plus tard de quelle façon est définie cette unité). Dans ce système d'unités, la valeur de la charge élémentaire est (1.1) TABLEAU 1.1 La masse et la charge des constituants de l'atome Parti cule Masse (kg) Charge Élec 9,109 × 10−31 tron −e Proton 1,673 × 10−27 +e Neu tron 1,675 × 10−27 Il existe d'autres particules subatomiques dans l'Univers. Diverses expériences ont montré que la charge est quantifiée. La charge de toute particule est égale à un multiple entier de la charge élémentaire. Si on représente par q la charge d'une particule, alors q = Ne, où N est un entier positif, négatif ou nul*. * Nous verrons au tome 3 que les protons et les neutrons sont constitués de particules appelées quarks, qui peuvent avoir une charge +2e/3 ou −e/3. Cependant, ces particules élémentaires sont toujours regroupées pour former des particules ayant une charge égale à un multiple entier de la charge élémentaire. Quantification de la charge 0 8 CHAPITRE 01 — La charge électrique La matière qui nous entoure est formée d'atomes. Les atomes neutres possèdent autant d'électrons que de protons. Les expériences de la section 1.1 doivent être expliquées en fonction des électrons et des protons. Si un objet possède Np protons et Ne électrons, alors sa charge nette est (1.2) Un objet devient chargé lorsqu'il acquiert ou cède des électrons. En effet, les protons sont liés très fortement dans les noyaux. Cependant, certains des électrons peuvent être arrachés d'un atome. C'est l'ionisation. L'atome devient alors un ion positif. Certains atomes peuvent aussi accueillir un électron supplémentaire et devenir un ion négatif. On obtient les possibilités suivantes : • Ne = Np : la charge nette de l'objet est nulle, car celui-ci a autant de protons que d'électrons. On dit alors que l'objet est neutre. • Ne < Np : la charge nette de l'objet est positive, car celui-ci possède moins d'électrons que de protons. On dit que l'objet est chargé positivement. • Ne > Np : la charge nette de l'objet est négative, car celui-ci possède plus d'électrons que de protons. On dit que l'objet est chargé négativement. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 1.1 On frotte un ballon de fête contre des cheveux. Les cheveux deviennent chargés positivement, et le ballon devient chargé négativement. Lequel des énoncés suivants est vrai ? (i) Le frottement entre les cheveux et le ballon crée des électrons sur le ballon et des protons sur les cheveux. (ii) Le frottement entre les cheveux et le ballon entraîne un transfert de protons du ballon vers les cheveux. (iii) Le frottement entre les cheveux et le ballon entraîne un transfert d'électrons du ballon vers les cheveux. (iv) Le frottement entre les cheveux et le ballon entraîne un transfert d'électrons des cheveux vers le ballon. (v) Le frottement entre les cheveux et le ballon entraîne un transfert de protons des cheveux vers le ballon. La conservation de la charge Outre le fait d'être quantifiée, une autre propriété de la charge électrique est qu'elle est conservée : Principe de conservation de la charge La charge électrique ne peut pas être créée ni détruite. La charge nette d'un système fermé doit demeurer constante. Les expériences précédentes font intervenir l'échange d'électrons entre les objets.

Le principe de conservation de la charge est plus général.

Certaines particules subatomiques sont instables et se désintègrent. Par exemple, le neutron 1.2 — Les propriétés de la charge électrique libre se transforme en proton, en émettant un électron et un neutrino (une particule subatomique de très faible masse et de charge nulle) : Par convention, on place en exposant la charge des particules, exprimée en fonction de la charge élémentaire. Dans la désintégration précédente, la charge électrique initiale est nulle et la charge électrique finale est nulle. La charge est bien conservée. Il est aussi possible de créer des particules dans les grands accélérateurs de particules en convertissant de l'énergie en masse (selon la célèbre équation d'Einstein E 0 = mc 2). Cependant, lorsqu'on crée une particule de charge négative, une particule de charge positive est créée en même temps. La création de paires consiste par exemple à produire un électron (e−) et un positron (e+) à partir d'un rayon gamma (γ) de haute énergie : Le positron (aussi appelé positon) est l'antiparticule de l'électron, une particule ayant la même masse que l'électron, mais une charge +e. Le rayon gamma a une charge nulle. Il se transforme en deux particules, de telle sorte que la somme des charges électriques est égale à zéro. La transformation inverse de la création de paires est l'annihilation : lorsqu'un électron et un positron se rencontrent, ils disparaissent en produisant deux rayons gamma : Dans ce cas aussi, la charge est conservée. EXEMPLE 1.1 La radioactivité d'un détecteur de fumée Les détecteurs de fumée possèdent habituellement un élément radioactif, l'américium. Les noyaux de l'isotope utilisé contiennent 95 protons et 146 neutrons. Un noyau se désintègre de la façon suivante : Selon la notation utilisée en physique nucléaire, l'indice du bas représente le nombre de protons et l'indice du haut, le nombre de nucléons d'un noyau, c'est-à-dire la somme du nombre de protons et du nombre de neutrons. Quel est l'isotope ? SOLUTION Décortiquer le problème Résoudre le problème Nous trouvons la charge de l'isotope X : Dans l'équation de désintégration de l'énoncé, les indices inférieurs représentent la charge des noyaux correspondants, exprimés en fonction de la charge élémentaire, car chaque proton a une charge q = +e. Selon le tableau périodique de l'annexe G, l'élément qui possède 93 protons est le neptunium.

Donc, l'isotope cherché est (réponse) Valider la réponse Identifier la clé La clé est la conservation de la charge électrique : (i) Nous répondons bien à la question en trouvant l'isotope recherché. 9 10 CHAPITRE 01 — La charge électrique TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 1.2 Les situations suivantes présentent des réactions entre particules subatomiques. On place en exposant la charge de la particule, en fonction de la charge élémentaire. Donnez la charge de la particule sans exposant dans chacune des réactions. a. b. TABLEAU 1.2 Une série triboélectrique : lorsqu'on met en contact deux matériaux neutres, le matériau situé plus haut dans le tableau devient chargé positivement et le matériau situé plus bas devient chargé négativement.

Fourrure de lapin Verre Cheveux Nylon Laine Fourrure de chat Coton Soie Polyester Polyvinylchloré (PVC) Polyéthylène Caoutchouc Teflon c. d. La triboélectricité Les expériences 2 à 5 ont permis d'obtenir des objets chargés en frottant deux objets l'un sur l'autre. La triboélectricité consiste à mettre en contact deux objets pour qu'ils deviennent chargés, par l'échange d'électrons entre eux, l'un positivement et l'autre négativement. Le frottement augmente le nombre d'électrons transférés puisque la surface de contact entre les deux objets est plus grande. Si on frotte une tige de plastique avec de la laine, des électrons sont transférés de la laine au plastique ; la laine devient chargée positivement et le plastique devient chargé négativement. De la même façon, lorsqu'on frotte une tige de verre avec de la soie, il y a transfert d'électrons du verre à la soie. La soie devient chargée négativement, et le verre devient chargé positivement. Les expériences 2 à 5 montrent alors que les objets dont la charge est de signe opposé s'attirent, et que les objets dont la charge est de même signe se repoussent. Il est possible d'utiliser différents matériaux pour obtenir des objets chargés. Certains matériaux ont tendance à donner des électrons, alors que d'autres ont tendance à recevoir des électrons. On peut obtenir une série triboélectrique en classant les matériaux selon leur affinité à donner des électrons. Le tableau 1.2 offre un exemple d'une série triboélectrique : lorsqu'on frotte deux matériaux de cette série, le matériau qui est situé plus haut dans le tableau devient chargé positivement (il perd des électrons), et le matériau situé plus bas devient chargé négativement (il gagne des électrons). 1.3 Les isolants et les conducteurs Les prochaines expériences démontrent qu'on peut séparer les matériaux en deux types : les conducteurs et les isolants. Expérience 6 : Une tige de plastique chargée négativement est mise en contact avec un cylindre métallique. Le cylindre devient chargé négativement. Expérience 7 : On place une tige de plastique neutre entre le cylindre chargé à l'expérience 6 et un autre cylindre métallique. Le deuxième cylindre métallique reste neutre. 1.3 — Les isolants et les conducteurs 11 Expérience 8 : On place une tige métallique entre le cylindre chargé à l'expérience 6 et un autre cylindre métallique neutre. Le deuxième cylindre devient chargé négativement. Dans l'expérience 6, le contact entre la tige et le cylindre permet le transfert d'une partie de la charge négative de la tige vers le cylindre. Une partie des électrons se déplacent de la tige vers le cylindre. Cette expérience montre qu'il est possible de charger un objet en le mettant en contact avec un objet déjà chargé. Les expériences 7 et 8 montrent la différence entre un conducteur et un isolant. Le plastique est un isolant. La charge ne se déplace pas dans la tige de plastique de l'expérience 7, car les électrons du plastique sont liés fortement à leur atome. Ils ne peuvent pas se déplacer hors de l'atome, comme le montre la figure 1.3. Le verre et le caoutchouc sont aussi des isolants. La tige de métal de l'expérience 8 permet à de la charge de circuler du cylindre de gauche au cylindre de droite. Les métaux sont des conducteurs. Lorsque les atomes d'un métal sont liés dans un réseau cristallin, les nuages électroniques se superposent, et les électrons de valence sont partagés parmi tous les atomes du métal.

Ces électrons, qu'on appelle les électrons de conduction, peuvent se déplacer presque librement dans tout le métal, comme le montre la figure 1.4. En plaçant une tige métallique entre le cylindre chargé et le cylindre neutre, on permet aux électrons de se déplacer dans les trois conducteurs (qui n'en forment alors qu'un seul). On obtient une situation d'équilibre lorsque la charge est répartie entre les conducteurs. FIGURE 1.3 Dans un isolant, tous les électrons sont fortement liés à un atome particulier, et les nuages électroniques ne se superposent pas. REMARQUE On pourrait croire, en observant l'expérience 8, que les électrons du cylindre chargé se déplacent de la gauche vers la droite jusqu'au deuxième cylindre. Ce n'est pas le cas. En fait, tous les électrons de conduction se déplacent très légèrement, en exerçant une force électrique répulsive sur les autres électrons. La situation d'équilibre est donc atteinte très rapidement. L'air conduit légèrement, surtout s'il est humide. Un objet chargé va perdre sa charge graduellement en la partageant avec l'air.

Il est possible de décharger un objet en le mettant en contact avec le sol, comme l'illustre la figure 1.5. C'est ce qu'on appelle une mise à la terre. Le sol n'est pas aussi bon conducteur qu'un métal, (a) (b) (c) FIGURE 1.5 (a) Un conducteur chargé, avec la charge distribuée sur sa surface. (b) Le conducteur est relié au sol à l'aide d'un fil conducteur. La charge se déplace dans le sol. (c) Le conducteur devient neutre après un très petit intervalle de temps. FIGURE 1.4 Dans un conducteur, les nuages électroniques se superposent, et les électrons de conduction sont partagés entre les atomes. Ils peuvent se déplacer dans tout le métal. 12 CHAPITRE 01 — La charge électrique mais il peut contenir une grande quantité de charges supplémentaires. En mettant un objet à la terre, celui-ci partage ses électrons avec le sol en entier. À l'équilibre, l'objet devient neutre, car les charges excédentaires vont se répartir dans la terre. Il est important de mettre à la terre certains appareils et certains circuits afin d'empêcher qu'une charge excédentaire s'accumule sur l'appareil.

On verra au chapitre 4 qu'un excès de charge produit une différence de potentiel électrique entre l'objet et la terre.

La troisième connexion d'une prise de courant est la mise à la terre. Cette fiche est souvent reliée à un élément de plomberie métallique qui est en contact avec le sol. Pour indiquer une mise à la terre, on utilise habituellement le symbole .

EXEMPLE 1.2 Deux sphères conductrices en contact Deux sphères conductrices sont identiques : elles ont le même rayon. La première sphère porte une charge de 6,0 nC et la deuxième, une charge de −9,0 nC. Les deux sphères sont rapprochées jusqu'à ce qu'elles se touchent, puis elles sont éloignées. Quelle est la charge de chaque sphère après qu'elles ont été éloignées l'une de l'autre ? SOLUTION Illustrer la situation Identifier la clé La clé est la conservation de la charge : La figure 1.6 illustre l'état initial, lorsque les sphères sont en contact et l'état final. (ii) Résoudre le problème Décortiquer le problème En insérant l'équation (i) dans l'équation (ii) et en isolant q1f, nous obtenons En plaçant les sphères conductrices en contact, cela permet à la charge de se déplacer d'une sphère à l'autre.

À l'équilibre, chaque sphère doit avoir la même charge, car les sphères sont identiques. Donc, (i) (réponse) Valider la réponse La charge sur chaque sphère doit être négative, car, au départ, la charge nette du système est négative. initial en contact final FIGURE 1.6 Le schéma de la situation pour l'exemple 1.2 L'induction électrique dans les conducteurs Jusqu'à présent, nous avons observé la force électrique entre deux objets chargés. Peut-on observer une force entre un objet chargé et un objet neutre ? La figure 1.7a montre l'effet obtenu lorsqu'on approche un objet chargé positivement d'un conducteur neutre. Des électrons de ce dernier seront attirés par la 1.3 — Les isolants et les conducteurs charge positive située à gauche et ils vont s'accumuler sur la surface gauche du conducteur. Comme le conducteur est neutre, il y aura des ions positifs excédentaires sur la surface opposée. Une séparation de la charge se produit donc dans le conducteur neutre. C'est de l'induction électrique. Le conducteur subit deux forces de sens opposés : la force attractive sur les charges négatives et la force répulsive sur les charges positives. Étant donné que les charges négatives sont plus rapprochées de la tige chargée, la force attractive a un plus grand module que la force répulsive, ce qui fait que la force résultante sur le conducteur est attractive. Si on approche plutôt une tige chargée négativement du conducteur, comme le montre la figure 1.7b, on obtient aussi une force attractive. Cette fois-ci, les électrons de conduction du conducteur sont repoussés vers la surface la plus éloignée, en laissant des ions positifs sur la surface du conducteur du côté de la tige. Il y a encore deux forces et à nouveau, la force attractive a un module plus grand, car cette force s'exerce sur des charges plus rapprochées de la tige. (a) L'induction électrique permet de charger un conducteur en utilisant une mise à la terre.

La figure 1.8 montre les étapes à suivre : 1° On approche un objet chargé d'un conducteur mis à la terre. Cela induit une charge sur le conducteur de signe opposé à la charge de l'objet. 2° On enlève la mise à la terre pendant que l'objet chargé est gardé près du conducteur. (b) FIGURE 1.7 L'induction électrique produit une force résultante attractive sur le conducteur. 3° On éloigne finalement l'objet chargé. Le conducteur a maintenant une charge nette opposée à la charge de l'objet utilisé. L'ordre des étapes est important. Si on éloigne l'objet chargé avant de couper la mise à la terre, le conducteur va alors redevenir neutre, la terre fournissant la charge nécessaire pour annuler celle qui est déjà présente sur le conducteur. FIGURE 1.8 1° 2° 3° Les trois étapes pour charger un conducteur par induction L'électroscope L'électroscope est un appareil simple permettant d'observer la charge électrique. Il est constitué de deux feuillets d'or ou d'aluminium dans un boîtier, reliés par une tige conductrice à une sphère conductrice extérieure (voir la figure 1.9). Lorsqu'on approche un objet chargé négativement de la sphère (voir la figure 1.10a), les électrons de l'électroscope sont poussés vers les feuillets et ceux-ci deviennent chargés négativement par induction électrique ; les feuillets se repoussent. Si on FIGURE 1.9 FIGURE 1.10 Un électroscope à feuille (a) On approche un objet négatif ; (b) on approche un objet positif ; dans les deux cas, les feuillets de l'électroscope se repoussent.

13 14 CHAPITRE 01 — La charge électrique approche plutôt un objet chargé positivement (voir la figure 1.10b), les électrons se dirigent cette fois-ci vers la sphère. Les feuillets sont chargés positivement et ils vont aussi se repousser. L'électroscope n'indique pas le signe de la charge dans cette utilisation. Pour connaître le signe de la charge portée par un objet, on doit d'abord charger l'électroscope avec une charge de signe connu, comme le montre la figure 1.11a où l'électroscope est chargé négativement.

Les feuillets se repoussent et forment un angle initial θi. Si on approche un objet chargé négativement, comme à la figure 1.11b, les électrons de l'électroscope sont poussés vers les feuillets. La force de répulsion est plus grande et les feuillets forment un angle θf > θi. Si au contraire on approche un objet positif, comme à la figure 1.11c, alors des électrons sont attirés vers la sphère, en laissant moins d'électrons sur les feuillets.

Les feuillets se repoussent moins et forment un angle θf < θi. (a) (b) (c) FIGURE 1.11 (a) L'électroscope initialement chargé permet de connaître la charge d'un objet, (b) qu'il soit chargé négativement ou (c) qu'il soit chargé positivement. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 1.3 La figure ci-dessous illustre quatre objets et leurs interactions.

L'objet a est un morceau de plastique chargé négativement, et l'objet b est un morceau de verre chargé positivement. a.

Quel est le signe de la charge des autres objets ? b. L'interaction entre a et d est-elle attractive ou répulsive ? c. L'interaction entre c et d est-elle attractive ou répulsive ? La polarisation dans les isolants Défi animé 1.1 Un objet chargé peut-il être attiré par un objet neutre ? La force électrique s'exerce aussi entre un objet chargé et un isolant neutre. C'est le cas lorsqu'un morceau de plastique frotté avec de la laine attire de petits bouts de papier, ou lorsqu'un ballon de fête qui a été frotté sur des cheveux reste collé au mur. Dans ce cas, le ballon est chargé, mais le mur est neutre. Cette force s'exerce même si les électrons du mur restent liés aux atomes. 1.4 — La loi de Coulomb 15 Regardons d'abord en détail les forces qui s'exercent sur un atome qui se trouve près d'une charge négative extérieure, comme le montre la figure 1.12. Le noyau positif subit une force vers la gauche, et les électrons formant le nuage électronique subissent une force vers la droite. En conséquence, le nuage électronique va se déplacer très légèrement vers la droite. Le centre de ce nuage ne correspond plus au centre du noyau (la figure est exagérée pour faciliter la visualisation). Il y a une séparation de charge. L'atome est équivalent à deux charges opposées séparées par une petite distance, ce qu'on appelle un dipôle électrique. L'atome est polarisé. L'atome subit alors une légère force résultante vers la charge extérieure. Revenons à l'exemple du ballon de fête qu'on approche d'un mur. Le ballon ayant été frotté sur des cheveux, il devient chargé négativement. Si on le place contre un mur, cela polarise les atomes près de la surface du mur, de telle sorte que la distance entre les noyaux positifs et le ballon est plus faible que la distance entre les nuages électroniques et le ballon (voir la figure 1.13). Il y a une petite force attractive entre le mur et le ballon. 1.4 FIGURE 1.12 La charge négative extérieure polarise l'atome et exerce une force résultante attractive. La loi de Coulomb Les expériences de la section 1.1 ont montré que les objets chargés exercent une force électrique les uns sur les autres. Cette force est attractive lorsque les charges sont de signes opposés, et elle est répulsive lorsque les charges sont de même signe. De plus, le module de cette force augmente si on augmente la valeur des charges ou si on diminue la distance entre les objets. FIGURE 1.13 La polarisation des atomes du mur est responsable de l'attraction entre le mur et le ballon de fête. La relation entre la quantité de charge, la distance et la force a été découverte par le physicien et ingénieur français Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) (voir la figure 1.14). Coulomb a découvert que, pour deux charges ponctuelles immobiles, le module de la force est proportionnel au produit des charges et inversement proportionnel au carré de la distance entre les charges. Prenons deux charges ponctuelles q1 et q2 immobiles séparées par une distance r, comme le montre la figure 1.15. La charge q1 subit une force exercée par la charge q2, et la charge q2 subit une force exercée par la charge q1. Les forces et forment une paire action-réaction : elles ont le même module et des orientations opposées. Selon la découverte de Coulomb, le module est FIGURE 1.14 où on insère une valeur absolue, car le module d'une force est toujours positif alors que les charges peuvent être positives ou négatives. Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), physicien et ingénieur français FIGURE 1.15 (a) Deux charges positives se repoussent ; (b) deux charges négatives se repoussent ; (c) deux charges opposées s'attirent. 16 CHAPITRE 01 — La charge électrique Dans le système international, la charge est mesurée en coulombs (C). Le coulomb est défini à partir de l'unité du courant électrique, l'ampère, notion qui sera abordée au chapitre 6. La constante de proportionnalité k est appelée la constante de Coulomb et sa valeur est : (1.3) La théorie de l'électromagnétisme repose sur l'étude des champs électriques et des champs magnétiques et non sur les forces. Les équations fondamentales du champ électrique sont plus simples lorsqu'on utilise une constante 0, appelée la constante électrique ou la permittivité du vide : (1.4) La valeur précise de cette constante est donnée à l'annexe B. Il est donc possible de calculer le module de la force électrique à l'aide des équations équivalentes suivantes : (1.5) REMARQUE La loi de Coulomb est similaire à la loi de la gravitation universelle de Newton. La force gravitationnelle et la force électrique dépendent toutes les deux de l'inverse de la distance au carré. EXEMPLE 1.3 Des conducteurs suspendus Deux petites sphères conductrices sont suspendues à l'aide de ficelles non conductrices de longueur L = 30,0 cm. Chaque sphère a une masse de 100 g. Lorsque les sphères portent chacune une charge q, elles se repoussent de telle sorte que l'angle entre chaque ficelle et la verticale est θ = 1,20°, comme le montre la figure ci-contre. Calculez la charge q. SOLUTION Illustrer la situation Décortiquer le problème Nous traçons le diagramme des forces sur la sphère de droite à la figure 1.16. Les sphères ont des charges identiques : elles se repoussent. Le système est en équilibre. Nous obtenons la distance entre les charges à l'aide du schéma : (i) FIGURE 1.16 Le diagramme des forces pour la sphère de droite 1.4 — La loi de Coulomb Identifier la clé La première clé est la première loi de Newton, car la sphère est en équilibre : 17 Nous insérons ce résultat ainsi que l'équation (iv) dans l'équation (ii) : (ii) (iii) La deuxième clé est la loi de Coulomb. Le module de la force électrique est donné par l'équation 1.5 : (iv) Résoudre le problème Nous isolons d'abord T dans l'équation (iii) : Valider la réponse Les deux réponses sont valides. Les sphères peuvent avoir chacune une charge positive ou chacune une charge négative, car, dans les deux cas, les deux sphères vont se repousser.

La forme vectorielle de la loi de Coulomb Pour obtenir l'orientation de la force, on se base sur le fait que la force est attractive dans le cas de charges de signes opposés et qu'elle est répulsive dans le cas de charges de même signe. Ceci peut être écrit de façon algébrique en tenant compte des signes des charges : la multiplication de deux charges de même signe implique que q1q2 > 0, alors que la multiplication de charges de signes opposés implique que q1q2 < 0. On ajoute ensuite un vecteur unitaire comme on l'a fait au chapitre 13 du tome 1 dans le cas de la force gravitationnelle. Pour calculer la force , exercée sur la charge q1 par la charge q2, on a recours au vecteur unitaire , orienté de q2 (l'agent) vers q1 (l'objet), comme l'illustre la figure 1.17.

Avec ce vecteur unitaire, la force exercée sur la charge q1 par q2 est (1.6) La figure 1.17 à la page suivante montre les trois possibilités en fonction des signes de q 1 et de q2. • Lorsque les deux charges sont positives, q1q2 > 0. La force est répulsive, c'est-à-dire que a le même sens que le vecteur unitaire (voir la figure 1.17a, à la page suivante). • Lorsque les deux charges sont négatives, q1q2 > 0. La force est répulsive, c'est-à-dire que a le même sens que (voir la figure 1.17b, à la page suivante). • Lorsque les charges sont de signes opposés, q1q2 < 0. La force est attractive, c'est-à-dire que est de sens opposé à (voir la figure 1.17c, à la page suivante). Loi de Coulomb 18 CHAPITRE 01 — La charge électrique (a) (b) (c) FIGURE 1.17 La relation entre le vecteur unitaire et la force dans les différentes situations MISE EN GARDE Dans l'équation 1.6, il n'y a pas de valeur absolue. Cette équation donne la force électrique exercée sur une charge, y compris l'orientation.

Le signe des charges est important pour donner le sens de la force en fonction du vecteur unitaire. Le vecteur unitaire Pour calculer le vecteur , nous considérons d'abord le vecteur déplacement , orienté de la charge 2 (l'agent) vers la charge 1 (l'objet, qui est encerclé en rouge).

Ce vecteur s'exprime en fonction de vecteurs position et . Comme l'indique la figure 1.18a, les vecteurs , et forment un triangle, ce qui implique qu'ils sont reliés par une somme vectorielle : En isolant , on obtient (1.7) Il est aussi possible d'exprimer le vecteur en fonction de ses composantes cartésiennes, comme l'illustre la figure 1.18b : (1.8) (1.9) On calcule finalement le vecteur unitaire en divisant le vecteur module : par son (1.10) (a) (b) FIGURE 1.18 (a) Le vecteur en fonction de santes cartésiennes. et de . (b) Le vecteur décomposé selon ses compo- 1.4 — La loi de Coulomb MISE EN GARDE Le vecteur est un vecteur déplacement. En général, le vecteur déplacement se calcule de façon vectorielle en soustrayant la position initiale de la position finale c'est-à-dire TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 1.4 Une charge q1 est située à la position située à la position a. Calculez et . b. Calculez et . et une charge q2 est Le principe de superposition Lorsque plusieurs charges exercent une force sur une charge q1, la force électrique résultante est obtenue à l'aide du principe de superposition : comme le montre la figure 1.19, on calcule la somme vectorielle des forces exercées sur q1 : (1.11) Principe de superposition FIGURE 1.19 La force résultante exercée sur q1 est la somme vectorielle des forces appliquées sur cette charge. EXEMPLE 1.4 Une charge à l'équilibre Une charge q1 = −3,0 nC est placée à l'origine d'un système de coordonnées cartésiennes. Une deuxième charge q2 = 1,5 nC est placée sur l'axe des x, à 25,0 cm à droite de q1. À quelle position faut-il placer une troisième charge pour qu'elle soit à l'équilibre ? SOLUTION Illustrer la situation Décortiquer le problème La figure 1.20 illustre le schéma de la situation pour trois endroits possibles où placer q3 : à gauche de q1 (voir la figure 1.20a), entre les deux charges (voir la figure 1.20b) ou à droite de q2 (voir la figure 1.20c). (a) FIGURE 1.20 Les positions sur l'axe des x pour q 3 (b) (c) 19 20 CHAPITRE 01 — La charge électrique Nous ne pouvons obtenir de situation d'équilibre ailleurs que sur l'axe des x, car, pour les autres points, les forces et ne sont pas parallèles. La force résultante ne peut donc être nulle si q3 est placée ailleurs que sur l'axe des x. Résoudre le problème Nous remplaçons les valeurs, en simplifiant les termes qui apparaissent dans les deux membres de l'équation : Identifier la clé La clé est que q3 est en équilibre si elle subit une force résultante nulle : (i) Nous calculons la racine carrée de chaque membre : Il faut donc que les deux forces aient le même module et des sens opposés. Ceci est impossible dans la situation de la figure 1.20a car, dans ce cas, le module de est toujours plus grand que le module de . En effet, les modules des forces sont dans cette région : (réponse) Valider la réponse avec |q1| > |q2 | et r 13 < r23. Donc, pour F3←1, le numérateur est plus grand et le dénominateur est plus petit, ce qui donne nécessairement un nombre plus grand que pour F3←2.

Il est également impossible d'obtenir l'équilibre dans la situation illustrée à la figure 1.20b, car les forces ont le même sens. Il reste à analyser la situation de la figure 1.20c. La charge q3 est placée à une position x, donc à une distance x − L de q2. Nous calculons le module de chaque force à l'aide de l'équation 1.5. Nous obtenons Nous obtenons bien x > L, c'est-à-dire une position à droite de q2. Remarquez que nous avons gardé seulement la racine positive car, selon le schéma, nous devons avoir x > L, avec x et L des longueurs positives. REMARQUE La position d'équilibre se trouve toujours plus près de la charge dont la valeur absolue est plus petite. De plus, cette position ne dépend pas de la valeur de q3. (ii) La méthode vectorielle Lorsque des charges sont situées dans un plan, il est important de bien calculer l'orientation des forces et d'appliquer l'algèbre vectorielle pour trouver la force résultante exercée sur une particule. La stratégie suivante donne les étapes importantes pour résoudre les problèmes à l'aide d'une méthode vectorielle dans laquelle on emploie le vecteur unitaire et l'algèbre vectorielle. La méthode vectorielle peut être utilisée dans les problèmes réels avec des charges situées dans l'espace en trois dimensions. Nous verrons aussi au chapitre 2 que cette méthode simplifie les calculs mathématiques dans le cas d'objets chargés qui ne sont pas ponctuels. 1.4 — La loi de Coulomb STRATÉGIE 1.1 21 La force électrique : méthode vectorielle Illustrer la situation Tracez un schéma de la situation en incluant l'objet et les agents. Encerclez l'objet pour bien l'identifier. Tracez les vecteurs unitaires, orientés des agents vers l'objet. Tracez les forces électriques : la force est répulsive dans le cas de charges de même signe, et elle est attractive dans le cas de charges de signes opposés. Tracez un système de coordonnées cartésiennes. Décortiquer le problème Identifiez bien les quantités connues et inconnues. Calculez les vecteurs position , , ..., orientés des agents vers l'objet, et les vecteurs unitaires correspondants : où r21 est la distance entre la charge q1 et la charge q2. Identifier les clés La première clé est la loi de Coulomb : Cette clé permet de calculer la force électrique exercée sur l'objet par chacun des agents. La deuxième clé est le principe de superposition : Résoudre le problème Remplacez les données connues dans les équations pour obtenir la quantité recherchée. Valider la réponse Vérifiez que les forces calculées sont conformes au schéma de la situation et que la réponse finale a du sens. EXEMPLE 1.5 La force sur une charge : méthode vectorielle Trois charges sont situées dans un plan, comme le montre la figure ci-contre. Les charges sont q1 = −1,80 μC, q2 = 3,50 μC et q3 = −1,40 μC. De plus, a = 5,20 cm. Calculez la force résultante exercée sur la charge q1. Exprimez votre réponse en fonc tion du module et de l'orientation. SOLUTION Illustrer la situation Le schéma de la situation est illustré à la figure 1.21 de la page suivante. Remarquez que les deux vecteurs unitaires sont orientés de q2 vers q1 et de q3 vers q1 respectivement, car l'objet est la charge q1. Pour les forces, est orientée vers la charge q2, car q1 et q2 ont des signes opposés, alors que la force est vers le bas parce que les charges q1 et q3 ont le même signe.

22 CHAPITRE 01 — La charge électrique Résoudre le problème Nous calculons les forces, en insérant les valeurs connues : FIGURE 1.21 Le diagramme de la situation de l'exemple 1.5 Décortiquer le problème Nous insérons ensuite ces résultats dans l'équation (vi) : Le vecteur , qui va de q2 vers q1, est un vecteur ayant une composante vers la droite et une composante vers le bas : La distance entre q2 et q1 correspond au module de ce vecteur : (vi) C'est la force que nous cherchons, mais notre travail n'est pas terminé. Nous devons exprimer le vecteur en fonction du module et de l'orientation, comme il est demandé dans l'énoncé de l'exemple. Nous calculons d'abord le module : (i) De même, le vecteur position le bas : est orienté vers La distance entre q3 et q1 est r 31 = a.

Nous calculons ensuite les vecteurs unitaires : (vii) Pour l'orientation, nous déplaçons le vecteur jusqu'à l'origine du système de coordonnées cartésiennes, comme l'illustre la figure ci-dessous. (ii) (iii) Le vecteur a une composante x négative et une composante y négative.

L'angle θ est Identifier la clé La première clé est la loi de Coulomb, pour calculer et : (iv) Donc, la force exercée sur la charge 1 est (v) La deuxième clé est le principe de superposition : (vi) (réponse) Valider la réponse Nous avons donné la force selon la forme désirée.

L'orientation est conforme au schéma de la situation. 1.4 — La loi de Coulomb EXEMPLE 1.6 23 Deux charges dans l'espace Une charge q1 de 2,0 μC se trouve à la position (2,0 ; −3,0 ; 5,0) cm.

Une deuxième charge q2 de 3,0 μC se trouve à la position (−4,0 ; −2,0 ; 3,0) cm. a. Calculez la force exercée sur la charge 2 par la charge 1. b. Quel est le module de la force exercée sur la charge 2 par la charge 1 ? Le module de ce vecteur donne la distance entre les deux charges : SOLUTION Illustrer la situation Il est plus difficile de visualiser la position des charges en trois dimensions. Nous illustrons la situation à la figure 1.22, en traçant des lignes parallèles aux axes pour nous aider. (ii) Le vecteur unitaire se calcule en divisant le vecteur par son module : (iii) SOLUTION a. Identifier la clé La clé est la loi de Coulomb : FIGURE 1.22 Le schéma de la situation pour l'exemple 1.6 (iv) Résoudre le problème Décortiquer le problème Nous remplaçons les valeurs dans l'équation (iv) : (réponse) Pour résoudre un problème en trois dimensions, nous devons utiliser la méthode vectorielle. Nous calculons d'abord le vecteur déplacement, de q1 vers q2 : SOLUTION b. Résoudre le problème Nous calculons le module : (réponse) Valider la réponse (i) Nous répondons bien aux questions. Nous avons arrondi les réponses à deux chiffres significatifs pour respecter la précision donnée dans l'énoncé. La méthode scalaire Il est possible de calculer la force électrique sur une charge ponctuelle en calculant d'abord le module des forces, puis les différentes composantes. Cette méthode scalaire peut simplifier les calculs dans certaines situations simples, 24 CHAPITRE 01 — La charge électrique mais elle complique le calcul dans le cas des objets non ponctuels et les problèmes en trois dimensions. Voici la stratégie relative à cette méthode. Nous résoudrons à nouveau l'exemple 1.5 en utilisant cette fois-ci la méthode scalaire. STRATÉGIE 1.2 La force électrique : méthode scalaire Illustrer la situation Tracez le diagramme des forces pour l'objet sur lequel sont exercées les forces électriques. Entourez l'objet pour bien l'identifier, tracez les forces électriques exercées par les agents en respectant l'orientation des forces : la force entre deux charges de même signe est répulsive, et la force exercée entre deux charges de signes opposés est attractive. Décortiquer le problème Écrivez les données connues et les inconnues. Identifier la clé La première clé est la version scalaire de la loi de Coulomb (l'équation 1.5) : Calculez le module de chaque force électrique exercée sur l'objet par un agent. À l'aide du schéma, déterminez les composantes cartésiennes de chaque force. Calculez ensuite la force résultante : Résoudre le problème Remplacez les valeurs pour obtenir la force : Valider la réponse Vérifiez que la réponse a du sens, en vous référant au besoin au diagramme des forces. EXEMPLE 1.7 La force sur une charge : méthode scalaire Trois charges sont situées dans un plan, comme le montre la figure ci-contre. Les charges sont q1 = −1,80 μC, q2 = 3,50 μC et q3 = −1,40 μC. De plus, a = 5,20 cm. Calculez le module et l'orientation de la force résultante exercée sur la charge 1. 1.4 — La loi de Coulomb 25 Ensuite, nous décomposons les forces selon leurs composantes cartésiennes, en utilisant le schéma. SOLUTION

Illustrer la situation Le diagramme des forces est présenté à la figure 1.23. composante x composante y La deuxième clé est le principe de superposition : (v) FIGURE 1.23 Le diagramme des forces pour l'exemple 1.7 (vi) Résoudre le problème Décortiquer le problème Nous insérons les composantes cartésiennes dans les équations (v) et (vi) : Nous calculons le module : L'angle f est obtenu par l'expression : (réponse) (i) La distance entre q_1 et q_2 se calcule à l'aide du théorème de Pythagore : Pour calculer l'orientation, nous traçons d'abord le vecteur , avec des composantes x et y négatives, de la manière suivante : (ii) Identifier la clé La première clé est la loi de Coulomb, sous la forme scalaire, pour calculer $F_{1\leftarrow 2}$ et $F_{1\leftarrow 3}$: (iii) L'angle θ entre le vecteur et la partie négative de l'axe des x est Donc, l'orientation est θ = 60,1° sous la partie négative de l'axe des x. (réponse) Valider la réponse (iv) Nous avons bien donné un module (positif) et une orientation.
La réponse a du sens selon le diagramme des forces.

26 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES RÉSUMÉ RÉSUMÉ Dans ce chapitre, nous avons présenté la charge électrique et la force électrique entre des charges immobiles. LES LOIS ET LES PRINCIPES Il y a deux types de charges : la charge positive et la charge négative. • La charge est quantifiée : tout objet a une charge q = Ne avec N, un nombre entier, et e, la charge élémentaire : • La charge de la matière ordinaire vient des protons (charge +e) et des électrons (charge −e). • Pour des charges immobiles, la force exercée sur une charge ponctuelle q_1 par une charge q_2 est donnée par la loi de Coulomb: où k est la constante de Coulomb et électrique : 0, la constante • Un objet est chargé si on lui donne ou lui enlève des électrons. La charge d'un objet est Le vecteur unitaire est orienté de q_2 vers q_1 : • Un objet est électriquement neutre s'il possède autant d'électrons que de protons. Sa charge nette est nulle. • La charge est conservée : dans un système fermé, la charge nette du système ne change pas. Les objets chargés exercent les uns sur les autres une force électrique. • La force est attractive si les objets ont des charges de signes opposés. • La force est répulsive si les objets ont des charges de même signe.

• Le module de la force augmente si la charge des objets augmente ou si la distance entre les objets diminue. On divise les matériaux en deux types : les isolants et les conducteurs. • La charge se déplace facilement à l'intérieur des conducteurs. • La charge se déplace très difficilement dans un isolant. Les objets chargés attirent les objets neutres. • Pour un conducteur neutre, l'objet chargé crée une séparation de la charge par induction électrique. • Pour un isolant neutre, l'objet chargé polarise l'isolant en créant des dipôles électriques dans l'isolant. • Lorsque plusieurs charges exercent une force sur une charge q_1, la force électrique résultante est donnée par le principe de superposition: QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 27 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Q questions qualitatives • E exercices simples • P problèmes • solution disponible Section 1.2 Les propriétés de la charge électrique Q7 Une sphère conductrice fixée à un support est chargée Q1 Classez les systèmes suivants par ordre croissant de la positivement.

On suspend une deuxième sphère conductrice neutre près de la première (voir la figure 1.24). charge nette (de la plus négative à la plus positive). (i) Un noyau d'hélium (deux protons et deux neutrons) ; (ii) Un électron ; (iii) Un ion Na + ; a. Quel est le sens de la force électrique initiale sur la sphère de droite ? b. Quel est le sens de la force électrique sur la sphère de droite si elle touche à celle de gauche ? (iv) Une solution contenant une mole d'ion K+ et une mole d'ion Cl− ; (v) Une tige de verre chargée, sur laquelle il manque quatre électrons. E2 Une tige de plastique et un morceau de laine sont initia- lement neutres. On les frotte ensemble. La tige de plastique porte alors une charge de −1,5 nC. FIGURE 1.24 • Question 7 a. Quelle est la charge portée par la laine ? Q8 La figure 1.25 montre quatre groupes de deux sphères b. Combien d'électrons ont été transférés d'un objet à l'autre ? E3 La constante de Faraday F représente la quantité de charge contenue dans une mole de charges élémentaires. Calculez la valeur de F, exprimée en C/mol. P4 Une molécule d'eau est constituée d'un atome d'oxygène (possédant huit protons) et de deux atomes d'hydrogène (possédant chacun un proton). Calculez la charge positive contenue dans 1,00 kg d'eau neutre. (Indice : Utilisez les données de l'annexe F). conductrices identiques avec leur charge initiale. On les met en contact, puis on les éloigne.

a. Classez les situations par ordre croissant de la charge sur la sphère de gauche après le contact (de la plus négative à la plus positive). b. Classez les situations par ordre croissant de la charge transférée à la sphère de gauche (de la plus négative à la plus positive) durant le contact. P5 Trouvez l'élément X dans les réactions nucléaires qui suivent. a. FIGURE 1.25 • Question 8 b. E9 On met en contact deux sphères conductrices iden- c. tiques, puis on les sépare. La charge finale sur chaque sphère est de 4,5 μC. Si la première sphère était initialement neutre, quelle est la charge initiale de la deuxième ? Section 1.3 Les isolants et les conducteurs Q6 Un conducteur est mis à la terre. On approche de celui- Section 1.4 La loi de Coulomb ci un morceau de verre chargé positivement, sans que les deux se touchent. Q10 On place des charges positives identiques q vis-à-vis a. On débranche la mise à la terre avant d'éloigner le morceau de verre. Quel est le signe de la charge du conducteur ?

b. On éloigne le morceau de verre, puis on débranche la mise à la terre. Quel est le signe de la charge du conducteur ? des 12 chiffres d'une horloge circulaire de rayon R. On place une autre charge positive Q au centre de l'horloge. a. Quelle est la force résultante sur la charge Q ? b. On enlève la charge q vis-à-vis du chiffre 4. Quelle est la force résultante sur la charge Q ? 28 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Q11 La figure 1.26 illustre quatre configurations consti- tuées de charges positives +q et négatives −q situées sur l'axe des x. La distance entre les charges est constante. Classez les configurations par ordre croissant (du plus négatif au plus positif) de la composante de la force résultante sur la charge encerclée. (i) (ii) (iii) (iv) FIGURE 1.28 • Question 13 E16 Dans le modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène, l'élec- FIGURE 1.26 • Question 11 Q12 La figure 1.27 illustre deux charges (q_1 = +2q et q_2 = +q) qui ne sont pas fixées. On veut placer une troisième charge à l'un des points illustrés (le point c est à mi-chemin entre les deux charges) pour que la configuration complète soit en équilibre. a.

À quel point doit-on placer une troisième charge q 3 pour que celle-ci soit en équilibre ? b. Quel est le signe de la troisième charge q 3 pour que les autres charges soient en équilibre ? tron tourne autour d'un proton sur des orbites circulaires. Un électron se trouve sur l'orbite la plus rapprochée, dont le rayon est de 52,9 pm. a. Déterminez le module de la force électrique exercée sur l'électron par le proton. b. Calculez le rapport entre le module de la force électrique et le module de la force gravitationnelle qui sont exercées sur l'électron par le proton. c. Calculez le rapport entre le module de la force électrique exercée sur l'électron par le proton et le module de la force gravitationnelle exercée sur un électron par la Terre, pour un électron à la surface de la planète. (Indice : Utilisez les données de l'annexe B.) E17 Deux rondelles sont placées sur une table à coussin FIGURE 1.27 • Question 12 Q13 La figure 1.28 montre quatre configurations de trois charges. Classez ces configurations par ordre croissant selon le module de la force résultante exercée sur la charge positive +Q. E14 Deux petites sphères ont des charges q_1 = 150 nC et q_2 = 230 nC respectivement. Quelle distance les sépare si elles se repoussent avec une force dont le module est de 0,24 N ?

d'air horizontale. La première rondelle a une charge de −2,50 μC et la deuxième, une charge de −1,90 μC. On immobilise les rondelles en les plaçant à une distance de 15,0 cm l'une de l'autre, puis on les laisse aller. L'accélération initiale de la première rondelle a un module de 2,30 m/s2, et l'accélération initiale de la deuxième a un module de 4,50 m/s2. a. Quel est le module de la force initiale exercée sur la pre mière rondelle ? b.

Quel est le module de la force initiale exercée sur la deuxième rondelle ? c. Quelle est la masse de la première rondelle ? E15 Deux sphères chargées s'attirent avec une force de d. Quelle est la masse de la deuxième rondelle ? 1,25 N quand elles sont séparées par une distance de 5,00 cm. Calculez la charge sur chaque sphère si le système est neutre. e. Quel est le module de l'accélération sur la première rondelle lorsque celle-ci se trouve à une distance de 30,0 cm de la deuxième rondelle ? QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES E18 Un grain 1,20 × 10−12 C. de poussière porte une charge 29 de a. Calculez l'accélération d'un proton lorsque celui-ci se trouve à une distance de 5,00 mm à gauche du grain de poussière. b. Calculez l'accélération d'un électron lorsque celui-ci se trouve à une distance de 5,00 mm à gauche du grain de poussière. E19 Deux charges q_1 = +4q et q_2 = +q sont séparées par une distance d (voir la figure 1.29), et elles sont libres de se déplacer. FIGURE 1.31 • Exercice 22 P23 Quatre charges sont placées aux coins d'un rectangle a. À quel endroit peut-on placer une troisième charge q 3 pour que celle-ci soit en équilibre ?

de côtés a = 12,0 cm et b = 8,50 cm (voir la figure 1.32). Calculez la force exercée sur la charge du coin inférieur gauche si q = 2,00 μC. b.

Quelle est la valeur de q 3 pour que l'ensemble de la configuration soit en équilibre. a. Exprimez votre réponse en fonction des vecteurs unitaires. b. Exprimez votre réponse en fonction du module et de l'orientation. FIGURE 1.29 • Exercices 19 et 20 E20 Deux charges q_1 = 108 nC et q_2 = 27,0 nC sont sépa- rées par une distance d = 9,00 cm (voir la figure 1.29), et elles sont libres de se déplacer. FIGURE 1.32 • Problème 23 a. À quel endroit peut-on placer une troisième charge q 3 pour que celle-ci soit en équilibre ? P24 On place trois charges aux sommets d'un triangle b.

Quelle est la valeur de q 3 pour que l'ensemble de la configuration soit en équilibre. équilatéral de côté a = 10,0 cm, comme l'illustre la figure 1.33. Calculez la force exercée sur la charge de gauche si q = 1,00 μC. E21 La figure 1.30 illustre trois sphères chargées qui sont placées sur l'axe des x. La charge sur chaque sphère est q_1 = 1,5 μC, q_2 = −2,0 μC et q_3 = −1,8 μC. Calculez la force exercée sur la charge q_3 si d = 2,0 cm. FIGURE 1.33 • Problème 24 FIGURE 1.30 • Exercice 21 P25 Quatre charges sont placées dans le plan des xy aux positions suivantes : E22 La figure 1.31 illustre trois charges. Calculez les vec- teurs unitaires indiqués ci-dessous. a. b. c. d. , , et Les valeurs des charges sont q_1 = 2,00 μC, q_2 = −1,80 μC, q_3 = −2,40 μC et q_4 = 1,10 μC. Calculez la force exercée sur la charge q_1. a. Exprimez votre réponse en fonction des vecteurs unitaires. b. Exprimez votre réponse en fonction du module et de l'orientation. 30 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES P26 Un dipôle est constitué d'une charge +q et d'une P30 Trois charges sont placées sur les coins d'une boîte charge −q séparées par une distance d. Le vecteur est orienté de la charge négative vers la charge positive, et son module est p = qd. On place une charge Q à une distance r du dipôle, comme le montre la figure 1.34. illustrée à la figure 1.36.

Les dimensions de la boîte sont e = 7,5 cm, L = 10,0 cm et h = 8,0 cm. a. Déterminez la force exercée sur la charge Q. b. Donnez une approximation de la force exercée sur la charge Q si r d. a. Calculez le vecteur . b. Calculez le vecteur unitaire c.

Calculez le vecteur . d. Calculez le vecteur unitaire FIGURE 1.34 • Problème 26 P27 Deux sphères métalliques sont suspendues au bout de cordes. En équilibre, elles sont à la même hauteur, comme le montre la figure 1.35. La distance entre les sphères est de 5,75 cm lorsque q 1 = −300 nC et q_2 = −200 nC. Calculez les angles θ1 et θ2 entre les cordes et la verticale si la sphère 1 a une masse de 50,0 g et la sphère 2, une masse de 100 g. FIGURE 1.36 • Problèmes 30 et 31 P31 On place les charges q_1 = 1,4 μC, q_2 = −2,3 μC et q_3 = 1,8 μC sur les coins d'une boîte, comme le montre la figure 1.36. Les dimensions de la boîte sont e = 7,5 cm, L = 10,0 cm et h = 8,0 cm. FIGURE 1.35 • Problème 27 a. Calculez la force . b. Calculez la force . c. Calculez la force résultante exercée sur la charge q 3. d. Déterminez le module de la force exercée sur la charge q_3. P28 Deux sphères métalliques identiques chargées s'attirent avec une force de 52,4 N lorsqu'elles sont séparées par une distance de 12,0 cm. On place un fil conducteur entre les deux, puis on enlève le fil sans changer la distance.

Les sphères se repoussent alors avec une force de 3,90 N.

P32 Une charge ponctuelle q_1 = 4,50 μC se trouve à la position . Une deuxième charge ponctuelle q_2 = −2,30 μC se trouve à la position . Un électron se situe à la position . a.

Quelle est la charge finale sur chacune des sphères ?

a. Calculez la force exercée sur l'électron.

b. Quelle est la charge initiale sur chaque sphère ? b.

Quelle est l'accélération de l'électron ? P29 Une charge q_1 est placée au point de coordonnées P33 Deux sphères identiques sont séparées par une dis- (12,00 ; 8,50) cm. Une deuxième charge q_2 = −410 nC est placée au point de coordonnées (−4,00 ; 2,30) cm. On ajoute une troisième charge q_3 = 200 nC pour que la charge q_1 soit en équilibre. Quelles sont les coordonnées de la position de q3 ? tance r fixe. On veut répartir une charge totale positive Q entre les deux sphères, la première sphère ayant une charge q et la deuxième, une charge Q − q. Pour quelle valeur de q la force répulsive entre les sphères aura-t-elle le plus grand module ? SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 31 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 1.1 (iv) Les protons sont fortement liés aux noyaux.

Ce sont les électrons qui se déplacent lorsqu'on électrise les objets par frottement. Le ballon devient chargé négativement, ce qui indique qu'il a reçu des électrons des cheveux. Les cheveux ont perdu des électrons et sont donc chargés positivement. 1.2 a. qΛ = 0 La charge est conservée : on doit avoir la même charge des deux côtés de l'équation de réaction. b. q Σ = +e c.

d. qΔ = +2e 1.3 a. qc = 0 et c est conducteur, qd > 0. L'objet c est attiré à la fois par a et b qui ont des charges opposées, ce qui signifie que c est un conducteur neutre. L'objet d est repoussé par l'objet b, ce qui signifie que sa charge a le même signe que la charge de b.

b. Elle est attractive. Leurs charges sont de signes opposés. c.

Elle est attractive. L'objet c est un conducteur neutre. Il est attiré par tous les objets chargés. 1.4 a. b. On fait la soustraction pour calculer on divise par le module r 21 = 6,4 cm. Le vecteur est opposé au vecteur . . Dans le cas de , Chapitre 32 Le champ électrique Buts du chapitre Dans ce chapitre, on définit et on calcule le champ électrique produit par des charges. Après l'étude de ce chapitre, vous serez en mesure : • de comprendre la notion de champ électrique ; • de calculer le champ produit par des charges ponctuelles et par une distribution de charge continue ; • de déterminer la force électrique exercée sur une charge électrique dans un champ ; • d'obtenir la trajectoire d'une charge dans un champ uniforme ; • de calculer le moment de force exercé sur un dipôle électrique dans un champ uniforme.

Préalables Ce chapitre porte sur la façon de calculer le champ électrique et la trajectoire d'une particule dans un champ. Revoyez : • la loi de Coulomb, présentée à la section 1.4 ; • le mouvement uniformément accéléré, étudié aux sections 4.2 et 4.3 du tome 1 ; • le moment de force, abordé à la section 12.1 du tome 1. 33 Les requins peuvent ressentir le champ électrique produit par leur proie. 34 CHAPITRE 02 — Le champ électrique Nous avons vu au chapitre précédent que les charges électriques exercent une force électrique les unes sur les autres. Cette force est une force à distance : les objets chargés n'ont pas besoin de se toucher pour que la force soit exercée. Nous abordons dans ce chapitre le médiateur de la force électrique appelé le champ électrique.

Chaque charge électrique produit autour d'elle un champ. De plus, lorsqu'une charge se trouve dans un champ, elle subit une force électrique. Vous ne pouvez pas voir directement les champs électriques mais ils sont présents autour de vous. Les champs électriques sont importants autant dans le fonctionnement de votre cœur et de votre cerveau que dans celui de votre ordinateur et de votre écran de télévision. De même, lorsque vous parlez à un ami au téléphone, ce sont des champs électriques qui transportent l'information entre les deux appareils. Les champs électriques sont imperceptibles aux sens des humains, mais ils sont détectés par les requins et certains autres poissons*. Le calcul de la force exercée sur un objet chargé peut être divisé en deux étapes : d'abord, nous allons voir comment calculer le champ électrique produit par des configurations de charges discrètes ou continues. Ensuite, nous allons calculer la force exercée sur l'objet chargé qui se trouve dans un champ électrique, et utiliser la mécanique afin d'étudier sa trajectoire. Ce chapitre est une première étape dans l'étude du champ électrique. Le concept de champ est essentiel à la compréhension de l'électromagnétisme ainsi que des circuits électriques au niveau microscopique. De plus, l'étude de la lumière qui sera faite dans le tome 3 reposera notamment sur la notion de champ électrique, car la lumière est un phénomène électromagnétique. 2.1 FIGURE 2.1 Lorsque q 1 se déplace, il faut que la force change instantanément, selon la loi de Coulomb. La notion de champ La force électrique est une force à distance, tout comme la force gravitationnelle et la force magnétique. On peut se demander dans ce cas comment se propage la force d'une charge à l'autre.

La figure 2.1 montre une charge q_1 qui exerce une force sur une charge q_2. Comment la charge q_2 « sait-elle » qu'il y a une charge q_1 près d'elle ? Qu'est-ce qui se passe si la charge q_1 se déplace, d'une position initiale (i) vers une position finale (f), comme l'illustre la figure ? Selon la loi de Coulomb, la force doit changer instantanément pour devenir la force , et suivre le mouvement de la charge q_1. C'est ce qu'on appelle l'effet à distance. L'effet à distance est un phénomène difficile à accepter par les physiciens.

Si les charges sont très éloignées l'une de l'autre, il devrait y avoir logiquement un délai afin que l'information du mouvement de la charge q_1 se rende jusqu'à la charge q_2. Le physicien anglais Michael Faraday (1791-1867) (voir la figure 2.2) a proposé un mécanisme différent, qui remplace l'action à distance. Selon Faraday, une charge électrique q_1 change l'espace autour d'elle en créant ce qu'il appela des lignes de force, qu'on appelle aujourd'hui un champ électrique. La charge q_1 est appelée une source de champ électrique. Une deuxième charge dans l'environnement de la première va subir une force électrique exercée par le champ électrique. Le champ électrique est le médiateur de la force électrique. Si la source se déplace, cela change graduellement le champ électrique. Il n'y a plus d'effet instantané ; la force électrique est alors une interaction locale entre le champ électrique et une charge. * Voir par exemple Douglas Fields. « Le sixième sens du requin », Pour la Science, n° 359, 2007. 2.1 — La notion de champ 35 On peut résumer ainsi le mécanisme de Faraday lorsqu'une charge q_2 subit une force électrique exercée par une charge q_1 : • Une charge q_1 produit un champ électrique . • Une charge q_2 plongée dans un champ électrique électrique. subit une force La figure 2.3 illustre une configuration plus complexe, avec une sphère chargée. Puisqu'un objet chargé produit un champ électrique, il doit exister un champ électrique autour des objets chargés de la configuration. Pour mesurer le champ à un point quelconque P, on place une charge-test positive q_0 à cet endroit, comme à la figure 2.3a. La charge q_0 joue le rôle d'une sonde. Le champ électrique est défini comme étant la force électrique par unité de charge : FIGURE 2.2 Michael Faraday (1791-1867), physicien anglais (2.1) Champ électrique On utilise une charge-test positive de telle sorte que le champ électrique a la même orientation que la force exercée sur cette charge (voir la figure 2.3b). Dans le SI, le champ électrique s'exprime en newtons par coulomb (N/C). Le tableau 2.1 donne certaines valeurs approximatives du module du champ électrique. TABLEAU 2.1 (a) (b) FIGURE 2.3 (a) On place au point P une charge-test positive q 0 qui subit une force électrique au point P a la même orientation que . . (b) Le champ Malgré ce que peut sembler montrer l'équation 2.1, le champ électrique à un point ne dépend pas de la valeur de la charge-test.

En effet, la force électrique est proportionnelle à la charge, ce qui signifie que le quotient de la force et de la charge ne dépend pas de la valeur de la charge. Il est aussi important de comprendre qu'à chaque point, il y a un champ électrique, même si on n'a pas placé de charge-test. Le champ est créé par la configuration d'objets chargés.

REMARQUE La valeur de la charge-test doit être assez petite pour qu'elle ne modifie pas la configuration initiale. Le champ électrique remplit l'espace entre les objets chargés. En général, c'est une fonction de la position et du temps ; on écrit donc (x, y, z, t).

On dit que le champ est uniforme lorsqu'il ne dépend pas de la position, qu'il est constant s'il ne dépend pas du temps et qu'il est variable s'il change en fonction du temps. En électrostatique, on étudie les configurations pour lesquelles le champ est constant, mais celui-ci peut être non uniforme, c'est-à-dire qu'il n'est pas le même d'un point à l'autre. Le module du champ électrique dans quelques situations Position ou situation E(N/C) Limite de détection des requins 10−6 Dans les fils conducteurs 10−2 Ondes radio 10−1 Dans la basse atmosphère 102 Près d'un objet chargé par frottement 103 Lumière du Soleil 103 Décharge dans l'air Membrane d'une cellule À l'intérieur d'un atome d'hydrogène 3 × 106 107 5 × 1011 36 CHAPITRE 02 — Le champ électrique On peut inverser l'équation 2.1 pour obtenir la force électrique exercée sur une charge par un champ électrique. En effet, si on connaît le champ à la position d'une charge q, la force électrique est alors donnée par l'expression : (2.2) Force électrique L'équation 2.2 est une équation vectorielle. L'orientation de la force dépend de l'orientation du champ électrique et du signe de la charge q, comme le montre la figure 2.4. (a) (b) FIGURE 2.4 On place une charge q au point P. (a) Une charge positive subit une force dans le même sens que le champ. (b) Une charge négative subit une force de sens opposé au champ. • Pour une charge q positive, la force électrique a le même sens que le champ électrique. • Pour une charge q négative, la force électrique a un sens opposé au champ électrique. Si un objet chargé dans un champ électrique ne subit pas d'autre force, on peut calculer son accélération à partir de la force électrique en utilisant la deuxième loi de Newton. Son accélération sera parallèle au champ ; l'accélération aura le même sens que le champ électrique pour une charge positive, et l'accélération sera de sens opposé au champ électrique dans le cas d'une charge négative. MISE EN GARDE Une charge subit une force exercée par le champ électrique produit par d'autres charges; une charge n'est pas sensible au champ créé par elle-même. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 2.1 La figure ci-dessous montre six situations où une charge se déplace dans un champ électrique uniforme. Dans chaque cas, indiquez l'orientation de la force électrique. 2.2 — Le champ de charges ponctuelles 2.2 37 Le champ de charges ponctuelles On commence l'étude du champ électrique en calculant le champ produit par une charge ponctuelle q. Une charge ponctuelle est un objet chargé dont les dimensions sont beaucoup plus petites que la distance où le champ est mesuré. On veut calculer le champ électrique à un point P situé à une distance r d'une charge ponctuelle q.

On utilise une charge-test positive q_0 au point P, comme le montre la figure 2.5. La force est donnée par la loi de Coulomb (selon l'équation 1.6 de la page 17) : (a) (b) (c) FIGURE 2.5 Le calcul du champ au point P produit par une charge ponctuelle Selon la définition du champ électrique, donnée par l'équation 2.1, on obtient (2.3) Champ d'une charge ponctuelle Nous verrons au chapitre 3 que cette expression donne aussi le champ électrique à l'extérieur d'une sphère uniformément chargée. Le vecteur est le vecteur unitaire radial, orienté de la charge q (la source du champ) vers le point P. Pour l'obtenir, on peut tracer le vecteur position entre la charge q et le point P, comme à la figure 2.6. On divise ensuite ce vecteur par son module : (2.4) L'équation 2.3 est une équation vectorielle. Pour une charge positive, le champ électrique a la même orientation que le vecteur unitaire, et son module diminue selon l'inverse de la distance au carré. Pour une charge q négative, le champ doit être opposé au vecteur unitaire, c'est-à-dire qu'il est orienté vers la charge ; son module diminue aussi avec l'inverse de la distance au carré. La figure 2.7 (voir la page suivante) illustre le champ près d'une charge positive et près d'une charge négative. MISE EN GARDE Dans la figure 2.7, il y a un champ partout autour de la charge. Les vecteurs représentent le champ électrique à la position du point correspondant. FIGURE 2.6 Le vecteur unitaire et le vecteur Défi animé 2.1 Si on place une charge ponctuelle dans un champ électrique uniforme, l'allure de ce champ sera-t-elle modifiée ? 38 CHAPITRE 02 — Le champ électrique (b) (a) FIGURE 2.7 Une représentation du champ électrique : (a) pour une charge ponctuelle positive ; (b) pour une charge ponctuelle négative. EXEMPLE 2.1 Le champ d'une charge ponctuelle Une charge négative q = −10,0 μC est placée à l'origine. Calculez le champ électrique au point P dont la position est Nous calculons alors la distance r ainsi que le vecteur unitaire : SOLUTION Illustrer la situation Le schéma de la situation est présenté à la figure 2.8. Nous avons tracé le vecteur unitaire (de la charge vers le point P) et le champ , vers la charge négative. (i) (ii) Identifier la clé La clé est l'équation 2.3 : FIGURE 2.8 Le schéma de la situation pour l'exemple 2.1 Résoudre le problème Nous remplaçons les valeurs : Décortiquer le problème Valider la réponse Comme la charge est située à l'origine, le vecteur est directement le vecteur position du point P. Le champ doit être orienté vers la charge négative. Pour le point P, cela veut dire une composante x négative et une composante y positive. C'est bien ce que nous obtenons. Le champ produit par plusieurs charges ponctuelles Il est également possible de calculer le champ électrique lorsque plusieurs charges ponctuelles sont présentes. La figure 2.9 montre deux charges ponctuelles. Pour obtenir le champ à un point P, on place à cet endroit une charge-test q_0. Comme nous avons vu au chapitre 1, la force électrique résultante est obtenue à l'aide du 2.2 — Le champ de charges ponctuelles principe de superposition (voir l'équation 1.11 de la page 19). Lorsque la configuration contient N charges ponctuelles, la force exercée sur q_0 est Le champ est (2.5) Principe de superposition C'est le principe de superposition pour le champ électrique. On peut donc dire : Le champ résultant à un point P est calculé en faisant la somme vectorielle de tous les champs produits par les charges présentes. Le champ électrique est une quantité vectorielle. Pour trouver le champ produit par chacune des charges, il est utile d'utiliser une méthode vectorielle basée sur l'équation 2.3 avec le vecteur unitaire pour chaque charge. Dans la figure 2.9, on illustre le vecteur unitaire (orienté de la source q_1 vers le point P) et le vecteur unitaire (orienté de la source q_2 vers le point P). La stratégie suivante utilise la méthode vectorielle pour calculer le champ produit par un groupe de charges ponctuelles. STRATÉGIE 2.1 Le champ électrique de charges ponctuelles Illustrer la situation Tracez un schéma avec toutes les charges et le point P, l'endroit où on veut le champ. Tracez les vecteurs unitaires, orientés des sources vers le point P. Tracez les champs électriques : le champ est orienté dans le sens opposé de la charge, pour une charge positive, et orienté vers la charge, pour une charge négative. Tracez un système de coordonnées cartésiennes. Décortiquer le problème Identifiez bien les quantités connues et inconnues. Calculez les vecteurs unitaires, orientés des sources vers le point P. Identifier la clé La première clé est l'équation 2.3 qui permet de calculer le champ produit par chacune des charges. Pour une charge i, le champ est où est le vecteur unitaire radial, orienté de la charge i vers le point P. La deuxième clé est le principe de superposition : Résoudre le problème Remplacez les données connues dans les équations pour obtenir la quantité recherchée. Valider la réponse . Vérifiez que les champs calculés sont conformes au schéma de la situation et que la réponse finale a du sens. FIGURE 2.9 On calcule le champ résultant à l'aide de la somme vectorielle des champs produits par chaque charge. 39 40 CHAPITRE 02 — Le champ électrique EXEMPLE 2.2 Trois charges dans le plan Trois charges (q_1 = q_3 = −2Q et q_2 = Q) sont placées comme le montre la figure ci-contre. Calculez le champ au point P, de telle sorte que les charges q_1, q_3 et le point P soient aux sommets d'un triangle équilatéral. SOLUTION Illustrer la situation Identifier les clés Le schéma de la situation est présenté à la figure 2.10. Les vecteurs unitaires et les champs électriques sont illustrés. La première clé est l'équation 2.3 qui permet de calculer le champ produit par chaque charge séparément : (iv) (v) (vi) La deuxième clé est le principe de superposition : (vii) Résoudre le problème FIGURE 2.10 Nous obtenons, en faisant la somme vectorielle, Le schéma de la situation lorsque Q > 0 pour l'exemple 2.2 Décortiquer le problème Nous calculons les vecteurs unitaires en utilisant les orientations illustrées à la figure 2.10 et en sachant que leur module est égal à 1. (réponse) Valider la réponse Le champ au point P n'a qu'une composante y, comme le montre la figure 2.10. La réponse est valable pour Q > 0 ou pour Q < 0. (i) (ii) (iii) 2.3 — Le champ électrique d'un dipôle EXEMPLE 2.3 41 Deux charges dans l'espace Une charge q_1 = 2,00 μC est placée au point de coordonnées (2,00 ; −3,00 ; 4,00) cm.

Une deuxième charge q_2 = −3,00 μC est placée au point de coordonnées (−1,00 ; 3,00 ; 1,00) cm. a.

Calculez le champ au point de coordonnées (1,00 ; 1,00 ; 1,00) cm. b. Calculez le module du champ au point de coordonnées (1,00 ; 1,00 ; 1,00) cm. SOLUTION a. Décortiquer le problème La deuxième clé est le principe de superposition : Résoudre le problème Les champs électriques sont Nous calculons d'abord les vecteurs unitaires et les distances entre les charges et le point P. Le champ résultant est (réponse) SOLUTION b. Identifier la clé Nous calculons le module avec la méthode habituelle : Identifier les clés La première clé est l'équation 2.3 qui permet de calculer le champ produit par chaque charge séparément : (réponse) Valider la réponse Nous répondons bien aux deux questions, en donnant un vecteur en a. et un module en b. 2.3 Le champ électrique d'un dipôle Un dipôle électrique est constitué de deux charges opposées +q et −q séparées par une distance d. Plusieurs atomes deviennent des dipôles lorsqu'on les place dans un champ électrique. Le nuage électronique se déplace légèrement à l'opposé du champ extérieur, et il n'est plus centré sur le noyau positif. On parle alors de dipôle induit (voir la figure 2.11). Certaines molécules, par exemple les molécules d'eau, sont de façon intrinsèque des dipôles électriques.

Comme le FIGURE 2.11 Un dipôle induit et un dipôle permanent 42 CHAPITRE 02 — Le champ électrique montre la figure 2.11, il y a deux électrons qui se retrouvent plus souvent près de l'atome d'oxygène, ce qui laisse les atomes d'hydrogène positifs. Dans ces molécules, le nuage électronique n'est pas centré sur les noyaux des atomes. On parle alors de dipôles permanents. FIGURE 2.12 Le vecteur est orienté de la charge négative vers la charge positive.

On caractérise un dipôle par son moment dipolaire électrique , défini comme un vecteur orienté de la charge négative vers la charge positive, et dont le module est p = qd (voir la figure 2.12) : Moment dipolaire électrique (2.6) où est le vecteur reliant la charge négative et la charge positive. Dans le SI, le moment dipolaire se mesure en C · m. On utilise aussi, dans certains domaines, une ancienne unité : le debye (D), nommée en l'honneur du physicien et chimiste néerlandais Peter Joseph Wilhelm Debye (1884-1966). Le facteur de conversion est Cette unité est utile, car elle est bien adaptée aux moments dipolaires moléculaires. Par contre, on doit exprimer le moment dipolaire dans l'unité du SI pour faire les calculs. La charge nette du dipôle est nulle, mais celui-ci produit quand même un champ électrique, car les deux charges ne sont pas situées à la même position.

On veut calculer le champ électrique à deux endroits importants : sur l'axe du dipôle et sur la ligne bissectrice. On s'intéresse aux points éloignés du dipôle, c'est-à-dire aux points dont la distance entre ceux-ci et le dipôle est beaucoup plus grande que la distance d entre les charges. La figure 2.13a illustre un dipôle placé à l'origine. Le dipôle est constitué d'une charge +q située à une distance d/2 au-dessus de l'origine et d'une charge −q située à une distance d/2 sous l'origine. Le moment dipolaire est . On veut calculer le champ au point P, situé à une distance r de l'origine sur l'axe des y (voir la figure 2.13b). Pour ce faire, on calcule le champ électrique résultant à l'aide du principe de superposition : où r+ = r − d/2 est la distance entre le point P et la charge positive et r− = r + d/2, la distance entre le point P et la charge négative. La figure 2.13c montre les vecteurs unitaires, qui sont tous les deux équivalents à . On obtient alors 2.3 — Le champ électrique d'un dipôle (a) (b) (c) FIGURE 2.13 (a) On veut calculer le champ au point P. (b) Les distances entre les charges et le point P. (c) Les vecteurs unitaires et les champs électriques. On remarque que le numérateur est proportionnel à . Dans la plupart des cas, on veut le champ à des distances r d, de telle sorte que le dénominateur est approximativement égal à r4. Avec ces deux éléments, on obtient le champ sur l'axe d'un dipôle, à une distance r du centre du dipôle : (sur l'axe du dipôle) . (2.7) On a calculé le champ au-dessus du dipôle. L'équation 2.7 est aussi valable pour un point sous la charge négative. Pour un point sur l'axe du dipôle, le champ a la même orientation que le vecteur moment électrique . Il est possible de calculer le champ électrique pour un point P qui se trouve sur la bissectrice perpendiculaire au dipôle. Pour un point situé sur l'axe des x à une distance r d (voir la figure 2.14), le champ électrique est (sur la bissectrice) . (2.8) Cette fois-ci, le champ est opposé au vecteur , et son module est deux fois plus petit que pour un point sur l'axe du dipôle. L'équation 2.8 est aussi valable pour les points sur la partie négative de l'axe des x.

REMARQUE Le champ électrique d'un dipôle décroît selon l'inverse de la distance au cube, alors que le champ d'une charge ponctuelle décroît selon l'inverse de la distance au carré. Donc, le champ décroît plus rapidement dans le cas d'un dipôle, car celui-ci est électriquement neutre. FIGURE 2.14 Le champ sur la bissectrice perpendiculaire au dipôle 43 44 CHAPITRE 02 — Le champ électrique 2.4 Les distributions continues de charge Les densités de charge FIGURE 2.15 Lorsque la charge est distribuée sur une ligne, on utilise la charge linéique λ. Jusqu'à présent, on a calculé le champ électrique produit par des charges ponctuelles, séparées par des distances importantes.

Dans certaines situations, les charges sont très rapprochées et très nombreuses.

C'est le cas pour la tige chargée de la figure 2.15.

Si cette tige porte une charge de −1 nC, cela représente un excès de charge négative d'environ 6 × 109 électrons.

Il est très ardu de considérer en détail ces milliards d'électrons.

On supposera plutôt que la charge est continue. Pour caractériser la charge d'un objet linéaire, comme une tige ou un fil, on utilise la charge linéique λ, qui représente la charge par unité de longueur. Pour un objet de longueur L, qui porte une charge nette Q uniformément distribuée, la charge linéique est définie par l'expression : (2.9) Charge linéique La charge linéique peut être positive ou négative, selon le signe de la charge nette de l'objet. L'unité de λ dans le SI est le coulomb par mètre (C/m). Si on veut obtenir la charge d'un élément de la tige, dont la longueur est ΔL, on multiplie la longueur de l'élément par la charge linéique : (2.10) REMARQUE Comme dans le tome 1, on utilise des majuscules pour les paramètres des objets et des systèmes, et des minuscules pour les paramètres des éléments des systèmes. Lorsque la charge est plutôt distribuée sur une surface, un plan par exemple, on définit la charge surfacique σ comme la charge par unité d'aire. La figure 2.16 montre un plan qui a une charge nette Q et une aire A.

La charge surfacique est Charge surfacique (2.11) La charge surfacique est aussi utilisée pour des objets dont la charge se trouve complètement à leur surface.

Dans le SI, l'unité de σ est le coulomb par mètre au carré (C/m2). Si on prend uniquement un élément ΔA, la charge de cet élément est Il est aussi possible que la charge soit distribuée dans le volume entier d'un objet, comme le montre la figure 2.17. Dans ce cas, on définit la charge volumique ρ comme la charge par unité de volume. Pour un objet de volume V qui a une charge nette Q, la charge volumique est Charge volumique (2.12) Dans le SI, la charge volumique est mesurée en coulombs par mètre cube (C/m3). Un élément ΔV de l'objet a alors une charge 2.4 — Les distributions continues de charge FIGURE 2.16 FIGURE 2.17 Lorsque la charge est distribuée sur une surface, on a recours à la charge surfacique σ. Lorsque la charge est distribuée dans un volume, on a recours à la charge volumique ρ. 45 REMARQUE La charge volumique est l'équivalent électrique de la masse volumique, définie comme étant la masse par unité de volume. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 2.2 Une tige de longueur L a une charge Q uniformément distribuée sur sa longueur. On coupe la tige en deux morceaux, de telle sorte que le second morceau est deux fois plus long que le premier. a. Quelle est la charge linéique de chacun des morceaux ? b. Quelle est la charge de chacun des morceaux ? Les définitions précédentes sont valables lorsque les densités de charge sont uniformes, c'est-à-dire qu'elles ne changent pas selon la position de l'objet.

Dans le cas contraire, on doit utiliser le calcul différentiel. Pour la tige illustrée à la figure 2.18, on considère un élément Δ x dont la charge est Δq. La charge linéique est définie comme étant le rapport entre la charge et la longueur lorsque celle-ci tend vers zéro : (2.13) REMARQUE L'élément analysé de la tige est appelé un élément infinitésimal. On utilise habituellement la lettre d pour représenter un tel élément : l'élément de charge infinitésimal est dq et sa longueur, dx. Pour calculer la charge totale de la tige, on doit faire la somme des charges de tous les éléments de la tige. Chaque élément a une charge Δq = λ Δ x. La charge totale est donc, en prenant la limite Δ x → 0, (2.14) La somme infinie est appelée l'intégrale. Si on sait de quelle façon λ varie d'un point à l'autre de la tige, il est possible de calculer la charge de la tige. FIGURE 2.18 Pour définir la charge linéique, on choisit un élément de longueur dx dont la charge est dq. 46 CHAPITRE 02 — Le champ électrique On obtient des résultats équivalents pour la charge surfacique et la charge volumique. Lorsque la charge est distribuée sur une surface de façon non uniforme, on prend un élément d'aire infinitésimal dA, sur lequel il y a une charge dq. Alors, (2.15) (2.16) Si la charge est répartie dans un volume de façon non uniforme, on divise celuici en éléments infinitésimaux dV, dont la charge est dq : (2.17) (2.18) Un bref aperçu de l'intégrale Comme on l'a décrit dans le tome 1, l'intégrale indéfinie est l'opération inverse de la dérivée. Par exemple, si la fonction f(x) est la dérivée de la fonction F(x), alors où C est une constante arbitraire qu'on appelle constante d'intégration. En effet, la dérivée d'une constante est nulle. On dit alors que F(x) est la primitive de f(x). Comme pour la dérivée, l'intégrale d'une somme est la somme des intégrales : De plus, lorsqu'une fonction est multipliée par une constante, on peut « sortir » la constante de l'intégrale : Le calcul d'une intégrale est plus complexe que le calcul d'une dérivée, car il n'existe pas de formule générale pour l'intégrale d'un produit. L'annexe E présente quelques formules d'intégrales indéfinies. Entre autres, dans le cas d'une puissance, on a (2.19) (2.20) où n est une constante. FIGURE 2.19 L'intégrale définie correspond à l'aire sous la courbe. Dans la plupart des cas en physique, on a besoin de calculer une intégrale définie, qui correspond à une somme infinie d'éléments infinitésimaux. C'est le cas lorsqu'on doit calculer l'aire sous une courbe. En effet, pour calculer l'aire sous la courbe de la fonction f (x), entre x = 1 et x = 2, on doit diviser l'aire en rectangles, de largeur Δ xi, comme le montre la figure 2.19. L'aire du rectangle situé 2.4 — Les distributions continues de charge 47 à la coordonnée xi est f (xi) Δ xi. L'aire totale est obtenue en faisant la somme sur tous les rectangles et en prenant la limite Δ xi → 0 : L'indice inférieur dans le symbole d'intégrale est la borne inférieure (le début de l'intervalle désiré), et l'indice supérieur est la borne supérieure (la fin de l'intervalle désiré). Si F(x) est la primitive de f (x) [c'est-à-dire que la dérivée de F (x) donne f (x)], alors Si, par exemple, f(x) = x 3, l'intégrale définie entre x = 1 et x = 2 (l'aire sous la courbe entre x = 1 et x = 2) est REMARQUE Il est inutile d'ajouter une constante d'intégration lorsqu'on calcule une intégrale définie, car celle-ci se simplifie de toute façon lorsqu'on remplace les bornes. EXEMPLE 2.4 La charge d'une tige Une tige de 10,0 cm est parallèle à l'axe des x et centrée par rapport à l'axe des y. Sa charge linéique est donnée par λ = (4,50 nC/cm3) x 2, où x est exprimé en centimètres. Calculez la charge nette de la tige. SOLUTION Illustrer la situation Identifier la clé La clé est l'équation 2.14 : La figure 2.20 illustre la tige centrée à l'origine et un élément dq situé à une coordonnée x. La tige est située entre x = −5,0 cm et 5,0 cm. (i) Résoudre le problème L'intégrale peut être calculée à l'aide de l'équation 2.19, après qu'on a sorti le terme constant : FIGURE 2.20 Le schéma de la situation pour l'exemple 2.4 (réponse) Décortiquer le problème Nous exprimons toutes les distances en centimètres et la charge en nanocoulombs. Valider la réponse Les unités sont correctes.

Le signe de la charge doit être positif, car, selon l'énoncé, λ est une fonction qui est toujours positive. 48 CHAPITRE 02 — Le champ électrique Le champ créé par une distribution continue On peut maintenant calculer le champ électrique à un point P près d'une distribution de charge continue. Prenons l'objet chargé de la figure 2.21. On choisit d'abord un élément de charge infinitésimal dq quelconque, qui est équivalent à une charge ponctuelle. Le point P est situé à une distance r de l'élément de charge. Selon l'équation 2.3, l'élément de charge produit un champ infinitésimal : FIGURE 2.21 L'élément infinitésimal dq produit au point P un champ infinitésimal . où est le vecteur unitaire orienté de dq vers le point P. Les autres éléments de l'objet produisent aussi des champs électriques. Le champ résultant est obtenu à l'aide du principe de superposition, la somme (en fait, une intégrale) vectorielle de tous les champs : Champ électrique (distribution continue) (2.21) Pour calculer cette intégrale, on doit exprimer dq en fonction d'une densité de charge. On doit aussi exprimer le vecteur unitaire en fonction des vecteurs unitaires cartésiens ( ), car ce sont des vecteurs dont l'orientation et le module sont constants, ce qui permet de les sortir de l'intégrale. La stratégie suivante donne les différentes étapes pour calculer le champ électrique d'une distribution continue. STRATÉGIE 2.2 Le champ produit par une distribution continue de charge Illustrer la situation Dessinez l'objet dans un système de coordonnées cartésiennes. Indiquez bien le point P où vous voulez calculer le champ. Sur le schéma, décomposez l'objet en éléments dq pour lesquels vous pouvez calculer le champ électrique . Tracez le vecteur unitaire et le champ . Décortiquer le problème • Exprimez l'élément dq en fonction d'une densité de charge : • Exprimez la distance r et le vecteur unitaire d'intégration et des autres paramètres. Identifier la clé La clé est l'équation 2.21 : en fonction de la variable 2.4 — Les distributions continues de charge Les bornes de l'intégrale correspondent aux limites de l'objet. Pour que le signe soit correct, la borne inférieure doit être la plus petite valeur de la variable d'intégration, et la borne supérieure doit être la plus grande valeur. Résoudre le problème • Si le facteur à intégrer est une somme, écrivez l'intégrale comme une somme d'intégrales. Sortez les constantes de l'intégrale, incluant les vecteurs unitaires cartésiens. • Calculez l'intégrale en utilisant au besoin la table d'intégrales de l'annexe E. • Remplacez les bornes de l'intégrale. Valider la réponse Vérifiez que l'orientation du champ est correcte. Il est aussi possible de vérifier le champ à une grande distance : si P est très éloigné par rapport aux dimensions de l'objet, celui-ci devient équivalent à une charge ponctuelle, et le champ REMARQUE Il est aussi possible de calculer le champ à l'aide d'une méthode scalaire, dans laquelle on calcule le module et les composantes du champ .

Cette méthode est plus complexe à utiliser dans le cas des distributions continues, car elle fait intervenir des fonctions trigonométriques qu'il faut ensuite exprimer en fonction de la variable d'intégration. EXEMPLE 2.5 À gauche d'un fil Un fil de 0,200 m est uniformément chargé. Sa charge linéique est λ = −2,60 μC/m. Calculez le champ électrique au point P illustré ci-dessous, situé à une distance d = 0,100 m du fil. SOLUTION Illustrer la situation Le schéma de la situation est présenté à la figure 2.22. L'élément de charge dq est situé à la position x, et sa largeur est dx.

Le vecteur unitaire est orienté de l'élément dq vers le point P. Le champ électrique est orienté vers la tige, car celle-ci a une charge négative. FIGURE 2.22 Le schéma de la situation pour l'exemple 2.5 49 50 CHAPITRE 02 — Le champ électrique Il ne reste qu'à remplacer les valeurs numériques : Décortiquer le problème (réponse) Ici, dq = λ dx. Comme le montre le schéma, et r = d + x. Le fil se situe entre x = 0 et x = L.

Valider la réponse La réponse est bien un vecteur orienté vers la droite, comme le montre le schéma. Il est aussi intéressant de vérifier l'équation (ii) si d L.

Dans ce cas, Identifier la clé La clé est l'équation 2.21 : (d L) (i) Résoudre le problème L'intégrale est calculée à l'aide de la table d'intégrales de l'annexe E. Nous obtenons ce qui correspond bien au module du champ pour une charge ponctuelle, car le fil devient équivalent à une charge ponctuelle. (ii) EXEMPLE 2.6 Le champ au-dessus d'une tige Une tige horizontale a une charge Q uniformément distribuée sur sa longueur L. Calculez le champ électrique à une distance y au-dessus de la tige, vis-à-vis du centre de celle-ci. SOLUTION Illustrer la situation La figure 2.23 illustre la tige et le point P. Le système de coordonnées est choisi pour que la tige soit parallèle à l'axe des x et centrée par rapport à l'axe des y. Nous considérons un élément dq à la position x > 0 à droite de l'origine et traçons le vecteur unitaire et le champ au point P. Décortiquer le problème L'élément dq a une largeur dx. La charge est uniformément distribuée, alors λ = Q/L est une constante : (i) Pour calculer le vecteur , nous traçons ses composantes cartésiennes à la figure 2.24. FIGURE 2.23 Le schéma de la situation pour l'exemple 2.6 2.4 — Les distributions continues de charge FIGURE 2.24 51 (iv) Les composantes du vecteur En insérant les résultats des équations (iii) et (iv) dans l'équation (ii), nous obtenons Identifier la clé La clé est l'équation 2.21 : Les bornes sont choisies à l'aide du schéma : x varie de −L/2 à L/2. Dans l'équation (ii), il est important de voir que y n'est pas une variable : c'est la distance entre le point P et le centre de la tige. Résoudre le problème Pour résoudre l'intégrale, nous l'écrivons comme la somme de deux intégrales et nous sortons les constantes : (ii) Ces intégrales se trouvent dans la table d'intégrales de l'annexe E. Nous obtenons pour la première intégrale : Cette réponse n'est pas la réponse finale, car elle est écrite en fonction de paramètres intermédiaires (λ et), qui ne sont pas dans l'énoncé du problème. Nous devons remplacer λ par Q/L et (réponse) Valider la réponse La réponse est bien un vecteur. Nous remarquons que la composante x du champ est nulle : la partie gauche et la partie droite de la tige produisent des composantes horizontales opposées qui ont le même module. Pour les points qui ne sont pas vis-à-vis du centre de la tige, le champ a une composante x et une composante y non nulle. La relation trouvée est valable pour tous les points situés au-dessus de la tige. Elle l'est aussi pour les points en dessous de la tige, avec y < 0. Nous vérifions que pour y L, le module du champ est (y L) , car, dans ce cas, la tige se comporte comme une charge ponctuelle. Il est aussi intéressant de prendre la limite y L : (y L) . (iii) De même, pour la deuxième intégrale, Ceci représente le module du champ dans la limite d'une tige infinie. Nous verrons au chapitre 3 une autre méthode pour calculer le champ électrique produit par une tige infinie. 52 CHAPITRE 02 — Le champ électrique EXEMPLE 2.7 Le champ d'un quart de cercle On courbe une tige pour former un quart de cercle de rayon R. La tige a une charge Q uniformément distribuée. Quel est le champ électrique au point P illustré ci-dessous ?

SOLUTION Identifier la clé Nous traçons le schéma de la situation à la figure 2.25. L'élément dq est un élément de l'arc de cercle.

Le vecteur unitaire est orienté vers l'origine. La clé est l'équation 2.21 : (i) Résoudre le problème Nous réécrivons l'intégrale comme la somme de deux intégrales : FIGURE 2.25 Le schéma de la situation pour l'exemple 2.7 (ii) Les intégrales sont données à l'annexe E. Décortiquer le problème On a dq = λ ds, où ds est la longueur de l'arc de cercle de l'élément dq. Cette longueur peut être exprimée en fonction du rayon de l'arc. En effet, la longueur d'un arc de cercle est s = Rθ, où θ est l'angle exprimé en radians.

Alors ds = R dθ, où dθ est l'angle infinitésimal de l'élément de l'arc de cercle. Donc, Il faut aussi remplacer la charge linéique par la charge divisée par la longueur de l'arc. Pour un quart de cercle, on a L = Rπ/2 et λ = 2Q/(πR). Nous obtenons alors l'angle θ est illustré sur le schéma.

Cet angle varie de 0 à π/2 rad. Remarquez que nous avons calculé les composantes du vecteur en utilisant la trigonométrie, car son orientation est connue et son module est égal à 1. (réponse) Valider la réponse Nous obtenons bien un vecteur. Le champ a des composantes x et y négatives, comme il est indiqué sur le schéma. Le champ est orienté selon un angle de 45°, ce qui correspond à l'axe de symétrie de l'arc de cercle. Nous avons supposé que Q > 0, mais la réponse finale est aussi valide pour Q < 0. 2.5 — Le champ produit par les anneaux, les disques et les plans 2.5 53 Le champ produit par les anneaux, les disques et les plans À partir de la méthode expliquée à la section précédente, calculons le champ électrique créé par trois distributions importantes : un anneau, un disque et un plan infini. Le champ produit par un anneau On veut obtenir le champ à un point P situé à la position z sur l'axe d'un anneau, comme le montre la figure 2.26. L'anneau a un rayon R et une charge Q uniformément distribuée.

Prenons d'abord un élément de charge dq situé sur l'axe des y, à gauche de l'origine. Selon la figure 2.27, FIGURE 2.26 Le calcul du champ au point P produit par un anneau uniformément chargé Le champ produit par cet élément est REMARQUE Dans la figure 2.26, on a supposé que dq est positif pour pouvoir tracer le champ . Cependant, la démonstration est valable quel que soit le signe de la charge. Prenons ensuite l'élément dq′ situé de l'autre côté de l'anneau, sur l'axe des y. Cet élément est situé à la même distance r que l'élément dq, mais il produit un champ électrique n'ayant pas la même orientation que le champ (voir la figure 2.26). On veut maintenant calculer le vecteur unitaire . La figure 2.27 montre la décomposition du vecteur selon ses composantes : Lorsqu'on additionne les champs et , les composantes y s'annulent et ne laissent qu'un champ orienté dans la direction de l'axe des z (perpendiculaire au plan de l'anneau). Les éléments de charge qui ont été choisis sont des éléments particuliers. Pour les autres éléments de charge, le champ infinitésimal produit a une composante parallèle au plan de l'anneau et une composante perpendiculaire. Pour chaque élément de charge, il y a un élément de charge opposé sur l'anneau, situé à la même distance du point P, de telle sorte que les composantes parallèles au plan de l'anneau vont s'annuler, laissant FIGURE 2.27 La décomposition de et selon leurs composantes cartésiennes 54 CHAPITRE 02 — Le champ électrique uniquement une composante z. Donc, le champ résultant est obtenu en intégrant la composante z : Dans cette intégrale, tous les paramètres sont des constantes : le rayon R de l'anneau, la distance z entre le point P et le centre de l'anneau et le vecteur .

On peut sortir toutes les constantes de l'intégrale : (2.22) où donne simplement la charge Q de l'anneau. Si la charge Q est positive, le champ est orienté vers le haut pour un point P audessus de l'anneau (avec z > 0) et vers le bas pour un point au-dessous de l'anneau (avec z < 0). Si la charge Q est négative, l'équation 2.22 demeure valide : le champ électrique est orienté vers l'anneau. Il est intéressant de regarder deux cas limites. Au centre de l'anneau, z = 0, et le champ de l'anneau est nul. Chaque élément de charge dq produit un champ électrique horizontal qui est annulé par un élément dq′ opposé. L'autre cas limite est z R, un point très éloigné de l'anneau. Le champ est alors donné par ce qui correspond au module du champ produit par une charge ponctuelle.

En effet, si le point P est très loin de l'anneau, la forme de l'anneau n'a plus d'importance. La figure 2.28 montre l'orientation du champ à différents points sur l'axe de l'anneau, et la figure 2.29 représente le module du champ en fonction de la distance z sur l'axe. Remarquez que le module du champ atteint une valeur maximale pour une distance z inférieure au rayon de l'anneau. FIGURE 2.28 Le champ le long de l'axe d'un anneau chargé positivement On a calculé le champ électrique pour des points sur l'axe de l'anneau. Il y a aussi un champ pour les points qui ne sont pas sur l'axe. Par contre, il est beaucoup plus difficile de calculer le champ pour ces points car il n'y a pas de symétrie pour simplifier le calcul. Nous reviendrons sur le concept de symétrie au chapitre 3. Le champ produit par un disque On veut maintenant obtenir le champ créé par un disque, de rayon R, ayant une charge Q uniformément distribuée sur sa surface. Encore une fois, on se limite aux points sur l'axe du disque. Comme la charge est uniformément distribuée, la charge surfacique est FIGURE 2.29 Le module du champ sur l'axe d'un anneau en fonction de la distance Jusqu'à présent, on a divisé les distributions continues de charge en éléments de charge dq ponctuels. Cette fois-ci, on utilise des éléments de charge infinitésimaux en forme d'anneau ayant un rayon r et une épaisseur dr, comme le montre 2.5 — Le champ produit par les anneaux, les disques et les plans 55 la figure 2.30. On emploie cette méthode, car on a déjà calculé le champ d'un anneau. La charge sur l'anneau est (2.23) car l'aire d'un anneau correspond à sa circonférence multipliée par son épaisseur. L'anneau produit donc un champ au point P, qu'on calcule à l'aide de l'équation 2.22, en remplaçant R par r et Q par dq, obtenue à l'aide de l'équation 2.23 : Pour obtenir le champ résultant du disque, on additionne vectoriellement les champs créés par tous les anneaux infinitésimaux, dont le rayon varie de r = 0 jusqu'à r = R. Il faut donc calculer l'intégrale : FIGURE 2.30 Le calcul du champ sur l'axe d'un disque où on a sorti les constantes de l'intégrale. L'intégrale est donnée à l'annexe E.

On obtient (sur l'axe d'un disque) .

(2.24) La valeur absolue du premier terme est nécessaire afin que l'équation donne le bon champ électrique, y compris l'orientation, pour des points sous le disque, avec z < 0.

Il est possible de vérifier que pour un disque chargé positivement (avec σ > 0), le champ est orienté dans le sens de pour des points au-dessus du disque (z > 0), et il est orienté dans le sens de pour des points sous le disque (z < 0).

La figure 2.31 illustre le champ sur l'axe d'un disque. REMARQUE Il faut se rappeler que donne une valeur positive. Donc, si C'est pour cette raison qu'on a écrit ce qui englobe toutes les possibilités. Comme d'habitude, c'est une bonne idée de vérifier si le champ tend vers celui d'une charge ponctuelle pour des points éloignés. Supposons que le point P est au-dessus du disque, avec z > 0 et z R.

Alors le module du champ, et on obtient, pour L'approximation est trop brutale. On a négligé des termes qui semblent petits mais ne sont pas négligeables par rapport à zéro. Il faut retourner à l'équation 2.24 : (2.25) FIGURE 2.31 Le champ électrique sur l'axe d'un disque uniformément chargé 56 CHAPITRE 02 — Le champ électrique n Le deuxième terme entre crochets est de la forme (1 + x) , avec x = R 2 /z2 et n = −1/2. Lorsque x 1, on peut utiliser l'approximation du binôme (donnée à l'annexe E) : lorsque x 1 . (2.26) On obtient alors une approximation pour le terme entre crochets : En insérant ce résultat dans l'équation 2.25, on obtient ce qui est bien le module du champ produit pour une charge ponctuelle. EXEMPLE 2.8 Le résultat de deux disques Deux disques identiques de rayon R sont séparés par une distance de 3R, comme le montre la figure ci-contre. Si chaque disque a une charge Q = 120 nC répartie uniformément, et que R = 6,00 cm, calculez le champ électrique au point P situé à une distance R du disque inférieur. SOLUTION Illustrer la situation Nous ajoutons, dans le schéma de la situation illustré à la figure 2.32, un système de coordonnées cartésiennes avec l'origine située au centre du disque du dessous, et l'axe des z orienté vers le haut. Le disque inférieur produit un champ orienté vers le haut, et le disque supérieur, un champ orienté vers le bas.

Décortiquer le problème Le point P est sous le disque du haut ; pour cette raison, z2 < 0. La charge surfacique sur chaque disque est (i) Identifier les clés La première clé est l'équation 2.24 donnant le champ sur l'axe d'un disque, car le point P est sur l'axe de chaque disque : FIGURE 2.32 Le schéma de la situation pour l'exemple 2.8 (ii) 2.5 — Le champ produit par les anneaux, les disques et les plans La deuxième clé est le principe de superposition : (iii) 57 Il ne reste qu'à remplacer la valeur numérique de la charge surfacique : Résoudre le problème Nous remplaçons les valeurs algébriques (z1 = R et z2 = −2R) pour obtenir les champs et : (réponse) Valider la réponse La réponse est un vecteur. Le champ résultant doit être orienté dans le sens de , car le point P est plus près du disque inférieur, et les deux disques sont identiques. Donc, le champ doit avoir un module plus grand que le champ . Il est intéressant de constater qu'étant donné que la distance entre P et chaque disque est un multiple du rayon des disques, le champ final dépend uniquement de la charge surfacique. Le champ produit par un plan isolant infini Il est possible d'obtenir le champ créé par un plan uniformément chargé, pour des points très près du plan, de telle sorte que le plan est pratiquement infini. La figure 2.33 montre un plan, qui correspond au plan des xy, dont la charge surfacique σ est uniforme.

On trouve le champ à un point P en prenant la limite d'un disque de rayon R avec $R \to \infty$. Selon l'équation 2.24, Le terme donne un vecteur orienté vers le haut pour les points au-dessus du plan et un vecteur orienté vers le bas pour les points en dessous du plan. De plus, le module de ce vecteur est égal à 1.
On définit donc le vecteur unitaire normal au plan : (2.27) Avec cette définition, le champ produit par un plan infini uniformément chargé est donné par : (plan infini uniformément chargé) . (2.28) Ce résultat est très intéressant : pour un point très près d'un plan uniformément chargé, le champ devient uniforme, c'est-à-dire qu'il ne change pas d'un point à FIGURE 2.33 Le champ produit par un plan infini 58 CHAPITRE 02 — Le champ électrique l'autre. La figure 2.33 illustre le champ électrique d'un plan infini. Évidemment, il n'est pas possible d'avoir un plan infini dans la réalité. Par contre, l'équation 2.28 est une bonne approximation pour les points près du centre d'un plan uniformément chargé dont les dimensions sont beaucoup plus grandes que la distance z. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 2.3 La figure suivante présente un plan infini dont la charge négative est uniformément distribuée. a. Tracez le champ électrique pour les points illustrés. b. Pour quel point le module du champ est-il plus grand ? Le champ produit par deux plaques parallèles La figure 2.34 montre deux grandes plaques identiques parallèles, séparées par une distance d beaucoup plus petite que la grandeur des plaques.
On place une charge +Q sur la plaque inférieure et une charge −Q sur la plaque supérieure. On fait l'approximation que les plaques sont infinies. FIGURE 2.34 Le calcul du champ produit par deux grandes plaques parallèles La plaque positive produit un champ orienté à l'opposé de cette plaque. La plaque négative produit un champ , orienté vers cette plaque. La figure 2.34 illustre les champs dans les trois régions. Dans la partie supérieure et la partie inférieure, les deux champs sont opposés. Dans la partie centrale, les deux champs ont la même orientation. Dans l'approximation des plans infinis, le module du champ produit par chaque plaque est uniforme ($E = \sigma/[2 \epsilon_0]$). On obtient alors (2.29) MISE EN GARDE Le champ existe de chaque côté de la plaque positive, sans s'arrêter à la plaque négative. La plaque négative n'arrête pas le champ . De même, le champ ne s'arrête pas à la plaque positive. La figure 2.35a montre le champ résultant lorsqu'on suppose que les plaques sont infinies : le champ existe uniquement entre les plaques et il est uniforme, c'est-à-dire qu'il ne varie pas d'un point à un autre. Il s'agit d'une très bonne approximation lorsque la distance d entre les plaques est beaucoup plus faible que les dimensions des plaques. Remarquez aussi que dans ce cas, la forme exacte des plaques n'est pas importante. La figure 2.35b illustre le champ réel. Entre les plaques, le champ est en grande partie uniforme, sauf sur les bords de celles-ci, où le champ varie légèrement. De plus, il y a un champ très faible, mais non nul à l'extérieur. 2.5 — Le champ produit par les anneaux, les disques et les plans Dans la pratique, la configuration des plaques parallèles est très importante pour produire un champ électrique uniforme. Nous verrons à la section 2.7 le mouvement de particules chargées dans un champ électrique uniforme. Il faudra se rappeler que ce champ est produit par deux plaques parallèles, ayant des charges opposées, avec des dimensions beaucoup plus grandes que la distance entre elles. (a) 59 Défi animé 2.2 Le champ électrique à l'intérieur d'un système de deux plaques parallèles chargées de signes opposés est-il vraiment uniforme ? (b) FIGURE 2.35 (a) Le champ produit par des plaques parallèles infinies. (b) Le champ électrique produit par des plaques réelles. EXEMPLE 2.9 Un accélérateur d'électrons Pour accélérer des électrons, on veut produire un champ électrique uniforme en utilisant deux plaques parallèles carrées, de 8,00 cm de côté et séparées par une distance de 350 μm. a. Comment doit-on placer les plaques ? b. Quelle est la polarité de chaque plaque ? c. Calculez la charge sur chaque plaque. SOLUTION a. Décortiquer le problème Nous avons des plaques dont les côtés = 80,0 mm sont beaucoup plus grands que la distance entre les plaques (d = 0,350 mm = 0,004 3). Nous pouvons donc les considérer comme infinies. Identifier la clé La clé est que le champ est perpendiculaire aux plaques. Donc, pour que le champ soit parallèle à l'axe des y : Les plaques doivent être parallèles au plan des xz. (réponse) SOLUTION b. Illustrer la situation La figure 2.36 montre une vue de face (avec l'axe des x sortant de la page) des plaques. Le champ est orienté dans le sens opposé de l'axe des y. FIGURE 2.36 Le schéma de la situation pour l'exemple 2.9 Identifier la clé La clé est que le champ doit être orienté de la plaque positive vers la plaque négative. Donc : La plaque de gauche est négative. (réponse) La plaque de droite est positive. (réponse) 60 CHAPITRE 02 — Le champ électrique SOLUTION c. Décortiquer le problème Résoudre le problème Nous pouvons isoler Q dans l'équation (ii) : Identifier la clé La clé est l'équation 2.29. Le module du champ est (i) avec $\sigma = Q/A = Q/ 2$. Le module du champ est donc (ii) Ceci représente la charge sur la plaque positive, alors que la charge de la plaque négative est l'opposé de cette charge. $Q_+ = 25{,}5$ nC (plaque de droite). (réponse) $Q_- = -25{,}5$ nC (plaque de gauche). (réponse) Valider la réponse Nous répondons bien aux questions. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 2.4 La figure suivante présente deux plaques infinies ayant des charges surfaciques uniformes et opposées. Classez les différents points illustrés par ordre décroissant selon le module du champ électrique à ces positions. 2.6 Les lignes de champ Bien que le champ électrique soit imperceptible, il est quand même réel. Afin de le visualiser, on a tracé pour certains points le vecteur champ pour ces positions. La méthode des lignes de champ est une autre méthode qui permet de visualiser le champ électrique présent. On trace les lignes de champ à l'aide de la technique suivante : TECHNIQUE 2.1 Les lignes de champ électrique 1.
Le champ électrique est tangent aux lignes de champ. 2. Le module du champ est proportionnel à la densité de lignes de champ : plus les lignes de champ sont rapprochées, plus le module du champ est grand. 2.6 — Les lignes de champ La figure 2.37 illustre les lignes de champ pour une charge ponctuelle positive et pour une charge ponctuelle négative. Les lignes de champ sont radiales. De plus, pour les points éloignés, la densité de lignes est plus faible que pour les points rapprochés, ce qui illustre le fait que le champ diminue avec la distance. (a) (b) FIGURE 2.37 Les lignes de champ (a) pour une charge ponctuelle positive et (b) pour une charge ponctuelle négative. Lorsque plusieurs charges sont présentes, les lignes de champ sont tracées en respectant les propriétés suivantes. • Les lignes de champ vont des charges positives vers les charges négatives (il peut y avoir des lignes à l'infini). • Le nombre de lignes de champ qui sont issues d'un objet ou qui se terminent sur un objet est proportionnel à la charge de l'objet. • Les lignes de champ ne se croisent pas. La première propriété découle du fait que le champ électrique est produit par les charges. La deuxième propriété est le résultat de l'étape 2 de la technique. Finalement, la troisième propriété assure que le champ a une orientation unique en tout point. Dans la figure 2.38, on peut voir les lignes de champ d'un dipôle centré à l'origine, avec le moment dipolaire (un vecteur orienté de la charge négative vers la charge positive) orienté dans le même sens que l'axe des z. Les lignes de champ montrent que le champ électrique est opposé au moment dipolaire pour les points situés sur l'axe des y (la bissectrice du dipôle) et qu'il est dans le même sens que pour les points situés sur l'axe des z, à l'exception des points qui se trouvent entre les deux charges. Nous avons obtenu ces résultats à la section 2.3. L'exemple du dipôle met en évidence un défaut dans les schémas de lignes de champ : on ne peut pas construire le schéma de la figure 2.38 à partir des schémas des lignes de champ des charges ponctuelles de la figure 2.37. Le principe de superposition est caché dans ces figures. Par contre, un schéma de lignes de champ donne une image plus globale qu'un diagramme où on ne trace que quelques champs électriques. Il est aussi possible de représenter le champ de distribution continue à l'aide d'un schéma de lignes de champ. La figure 2.39 illustre les lignes de champ pour deux grandes plaques parallèles ayant des charges surfaciques opposées, la configuration illustrée à la figure 2.35b. FIGURE 2.38 Les lignes de champ électrique d'un dipôle FIGURE 2.39 Les lignes de champ pour deux grandes plaques parallèles 61 62 CHAPITRE 02 — Le champ électrique TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 2.5 La figure ci-dessous montre les lignes de champ de deux charges différentes. a.
Quel est le signe de chaque charge ? b. Quel est le rapport $|q_1|/|q_2|$? 2.7 Le mouvement d'une charge ponctuelle dans un champ électrique Au début du chapitre, on a expliqué la méthode pour calculer la force électrique exercée par un ensemble de charges électriques sur une autre charge. La première étape consiste à calculer le champ électrique produit par l'ensemble des charges. C'est ce qui a été fait dans les dernières sections. Voyons maintenant la façon de calculer la force exercée sur une charge supplémentaire placée dans le champ. La figure 2.40 montre une région où il y a un champ électrique créé par des charges qui ne sont pas illustrées. Une charge q se trouve dans cette région. (a) (b) (c) FIGURE 2.40 (a) Un champ électrique est présent à la position du point. (b) Une charge positive subit une force dans le même sens que le champ. (c) Une charge négative subit une force opposée au champ. La charge peut être immobile ou en mouvement. Selon l'équation 2.2, la force électrique exercée sur la charge est Dans beaucoup de situations, la force gravitationnelle est négligeable, et il n'y a pas d'autre force exercée sur la charge. La force électrique est alors la force résultante. Selon la deuxième loi de Newton, On obtient donc l'accélération de la charge : (2.30) L'accélération dépend de la charge, de la masse et du champ électrique. 2.7 — Le mouvement d'une charge ponctuelle dans un champ électrique L'accélération a le même sens que lorsque la charge est positive, et l'accélération est de sens opposé à dans le cas d'une charge négative. À partir de l'accélération, la cinématique peut être utilisée pour obtenir le mouvement de la particule chargée. Comme on l'a expliqué dans le tome 1, l'accélération produit un changement de vitesse : • Le module de la vitesse augmente si a le même sens que . • Le module de la vitesse diminue si est opposé à . • L'orientation de la vitesse change si a une composante perpendiculaire à . Une particule chargée dans un champ uniforme Lorsqu'une charge se déplace dans un champ uniforme, son accélération ne change pas. Dans ce cas, il est possible d'utiliser les méthodes expliquées aux chapitres 3 et 4 du tome 1. En particulier, si l'accélération et la vitesse sont parallèles, alors le mouvement est un mouvement rectiligne.
Si l'accélération et la vitesse ne sont pas parallèles, alors le mouvement est semblable à celui d'un projectile, avec une trajectoire parabolique.
En plaçant l'axe des y parallèlement au champ électrique, il est possible d'utiliser une stratégie semblable à la stratégie 4.1 du tome 1, utilisée pour l'étude du projectile. STRATÉGIE 2.3 Une charge dans un champ uniforme Illustrer la situation Vous devez dessiner un schéma de la situation en traçant l'objet avec les points importants de sa trajectoire.
Numérotez ces points de façon séquentielle. Tracez un système de coordonnées cartésiennes avec l'axe des y orienté dans la même direction que le champ électrique, et en situant clairement l'origine. Décortiquer le problème Faites un tableau dans lequel vous indiquez les données connues et inconnues. Séparez le tableau selon les composantes x et y. Calculez les composantes de la vitesse initiale et de l'accélération à l'aide des équations suivantes : (2.31) (2.32) Identifier la clé La clé est l'une des équations de la cinématique en deux dimensions : (2.33) (2.34) (2.35) (2.36) 63 64 CHAPITRE 02 — Le champ électrique Lorsque le temps n'est pas important dans le problème, l'équation de la trajectoire peut être utilisée : (2.37) Résoudre le problème Vous devez résoudre l'équation ou le système d'équations pour trouver la quantité inconnue. Valider la réponse Vérifiez si vous répondez bien à la question, si la réponse a du sens, si les unités et le signe sont corrects. MISE EN GARDE Défi animé 2.3 Pouvez-vous contrôler la trajectoire d'un disque chargé à l'aide de la force électrique transmise par d'autres charges ? EXEMPLE 2.10 Contrairement à la situation relative au projectile, où l'accélération est toujours vers le bas, l'accélération de la charge peut être vers le haut ou vers le bas selon l'orientation du champ électrique et du signe de la charge. Un canon à électrons Des électrons, initialement au repos, sont accélérés vers la droite jusqu'à ce qu'ils atteignent une vitesse de module de $8{,}4 \times 10^6$ m/s.
Ceci est accom pli au moyen de deux grandes plaques parallèles, munies d'un orifice (voir la figure ci-contre). Les deux plaques sont séparées par une dis tance d = 1,2 cm. Calculez le champ électrique nécessaire. SOLUTION Illustrer la situation Le schéma de la situation est présenté à la figure 2.41. Nous plaçons l'axe des y vers la droite, avec l'origine visàvis de la position initiale de l'électron. FIGURE 2.41 Le schéma de la situation pour l'exemple 2.10 Décortiquer le problème Le champ électrique est confiné entre les plaques. Ceci implique que l'électron subit une accélération seulement lorsqu'il est entre les plaques. Le champ entre les plaques est uniforme, donc l'accélération est constante. 2.7 — Le mouvement d'une charge ponctuelle dans un champ électrique 65 pour ensuite calculer le champ électrique : Identifier les clés La première clé est la troisième équation du mouvement uniformément accéléré : (i) La deuxième clé est la deuxième loi de Newton, en tenant compte que l'électron subit uniquement la force électrique : (ii) Résoudre le problème Nous calculons d'abord l'accélération à partir de l'équation (i) : EXEMPLE 2.11 Donc, (réponse) Valider la réponse Le champ doit être orienté vers la gauche pour que la force exercée sur l'électron soit vers la droite. C'est bien ce que nous obtenons. La trajectoire d'un proton Un champ électrique uniforme est produit par deux grandes plaques parallèles ayant une longueur L = 15,0 cm (voir la figure ci-contre). Un proton est envoyé à partir de la gauche, avec une vitesse de $2{,}50 \times 10^5$ m/s selon un angle de 30,0° en dessous de l'horizontale. a. Calculez le temps pour que le déplacement horizontal du proton soit de L. b.
Quel est le déplacement vertical du proton ? c. Quelle est l'orientation de la trajectoire du proton après son passage entre les plaques ? SOLUTION Illustrer la situation Nous illustrons le schéma de la situation à la fi gure 2.42.
Il y a deux positions importantes : la position initiale (à gauche des plaques), où nous avons placé l'origine, et la position finale (à droite des plaques). FIGURE 2.42 Le schéma de la situation pour l'exemple 2.11 66 CHAPITRE 02 — Le champ électrique Décortiquer le problème Identifier la clé La clé est la composante y de l'équation 2.34 : (ii) Résoudre le problème Nous insérons les valeurs connues et la réponse précédente : La masse du proton se trouve à l'annexe B. Nous calculons les composantes de la vitesse initiale et de l'accélération : (réponse) SOLUTION c. Identifier la clé La clé est que la vitesse est parallèle à la trajectoire. Donc, l'orientation de la trajectoire à la sortie des plaques correspond à l'orientation de la vitesse finale. Nous devons calculer les composantes de la vitesse à l'aide de l'équation 2.33 : (iii) (iv) SOLUTION a. Décortiquer le problème Pour trouver le temps de passage, on utilise la composante x du mouvement, car nous connaissons la composante horizontale de la position finale, qui correspond à la longueur des plaques (x = L). Identifier la clé La clé est l'équation 2.34 : (i) Résoudre le problème Nous obtenons la composante y de la vitesse : Ici, la soustraction fait perdre un chiffre significatif. Les deux composantes sont positives, ce qui montre que la vitesse est orientée au-dessus de l'horizontale et vers la droite. Nous calculons l'orientation : Résoudre le problème En remplaçant les valeurs, nous obtenons (réponse) (réponse) SOLUTION b. Décortiquer le problème Nous avons besoin de calculer $\Delta y = y - y_0$. Nous analysons la composante y du mouvement. Valider la réponse Le temps en a. est très faible, car le proton a une grande vitesse. L'ordre de grandeur du déplacement obtenu a du sens. En b. le signe négatif indique que le proton s'est déplacé vers le bas. L'orientation de la trajectoire en c. indique que le proton se déplace vers le haut après son passage entre les plaques.
2.8 — Un dipôle dans un champ électrique 67 Une particule chargée dans un champ non uniforme Dans la plupart des situations étudiées à l'intérieur de ce chapitre, le champ électrique produit par une configuration de charges est non uniforme. Par exemple, le champ sur l'axe d'un anneau uniformément chargé est donné par l'équation 2.22 : Si une charge ponctuelle située sur l'axe des z approche de l'anneau, elle subit une force qui change en fonction du temps. On ne peut utiliser les équations du mouvement uniformément accéléré.
Il faut utiliser des méthodes du calcul intégral pour trouver la position à partir de la force exercée par le champ électrique. Nous verrons aussi une autre méthode au chapitre 4, basée sur l'énergie. Le champ créé par une charge ponctuelle est non uniforme, car il diminue avec la distance. Il est possible d'analyser la trajectoire d'une particule dans un champ radial constant (la particule chargée qui produit le champ doit être fixe) : lorsque la particule a une vitesse perpendiculaire au champ électrique. Dans ce cas, la force électrique est une force centripète : (2.38) La particule chargée a une trajectoire circulaire, de rayon r. 2.8 Un dipôle dans un champ électrique Nous avons vu au chapitre 1 qu'une force électrique peut être exercée sur un isolant neutre. Dans ce cas, les atomes se comportent comme des dipôles électriques.
Analysons maintenant les forces exercées sur un dipôle électrique (un objet dont la charge nette est nulle) dans un champ électrique. La figure 2.43 illustre un dipôle dans un champ uniforme Le champ électrique est celui qui est produit par d'autres charges électriques qui ne sont pas illustrées. Le dipôle pourrait se trouver entre deux plaques parallèles. Le dipôle est constitué d'une charge +q et par une charge −q séparées par une distance d. Il est caractérisé par son moment dipolaire orienté de la charge négative vers la charge positive. Pour obtenir la force résultante sur le dipôle, on calcule la force exercée sur chacune des charges constituant le dipôle : (2.39) Le dipôle ne subit pas de force résultante, mais il subit un moment de force. En effet, les deux forces illustrées n'ont pas le même point d'application. Selon le chapitre 12 du tome 1, le moment de force exercé par une force dont le point d'application se trouve à une distance r d'un pivot se calcule à l'aide de l'expression : FIGURE 2.43 Un dipôle dans un champ uniforme subit une force résultante nulle. 68 CHAPITRE 02 — Le champ électrique où φ est l'angle entre la force et le vecteur , qui va du pivot jusqu'au point d'application de la force .
Le signe positif est utilisé pour une rotation en sens antihoraire et le signe négatif, pour une rotation en sens horaire. Dans le SI, l'unité du moment de force est le newton mètre (N · m), qui a les mêmes dimensions que le joule. Cependant, l'unité joule doit être utilisée exclusivement lorsqu'il est question d'énergie. On peut calculer le moment de force par rapport au point O situé à mi-chemin entre les deux charges du dipôle. Selon la figure 2.43, chaque charge est située à une distance d/2 du point O, et chaque force produit une rotation en sens antihoraire. Le moment de force sur le dipôle est alors L'angle φ est l'angle entre le moment dipolaire et le champ , avec $0 \leq \varphi \leq 180°$. Dans la situation illustrée à la figure 2.43, le moment de force est positif, car il fait tourner le dipôle en sens antihoraire. Dans d'autres situations, la rotation peut être en sens horaire. On obtient donc, de façon générale, (2.40) Comme on l'a vu au chapitre 12 du tome 1, le moment de force est en fait un vecteur, avec τ_z sa composante z (et et dans le plan des xy). Pour un dipôle dans un champ uniforme, l'équation précédente se généralise ainsi : Moment de force sur un dipôle τ × (2.41) Il est important de constater que le moment de force tend à aligner le dipôle dans le même sens que le champ électrique, de telle sorte que l'angle φ s'approche de 0°. De plus, le moment de force est nul lorsque φ = 0°. Cette configuration correspond à un équilibre stable du dipôle (la configuration φ = 180° est un équilibre instable). FIGURE 2.44 Un isolant dans un champ électrique extérieur Si on revient aux atomes d'un isolant dans un champ électrique extérieur, on voit que ce champ va faire tourner les atomes pour que leur moment dipolaire soit aligné de la même façon que lui. On aura alors la situation de la figure 2.44, qui est semblable à celle de la figure 1.13 de la page 15.
L'isolant devient polarisé : il y a un surplus de charge négative d'un côté et un surplus de charge positive de l'autre côté. L'isolant neutre subit une force électrique dans le même sens que le champ extérieur. Nous verrons au chapitre 3 l'effet de la polarisation sur le champ à l'intérieur d'un isolant. 2.8 — Un dipôle dans un champ électrique EXEMPLE 2.12 69 Une molécule d'eau dans un champ Une molécule d'eau a un moment dipolaire de $6{,}17 \times 10^{-30}$ C · m orienté selon un angle de 20,0° à droite de l'axe des y. Un champ électrique est présent. Calculez le moment de force exercé sur la molécule. SOLUTION Illustrer la situation La figure 2.45 illustre l'orientation du moment dipolaire et du champ électrique. L'angle θ est l'angle entre et l'axe des y. L'angle important est l'angle f = 90,0° − θ, entre les deux vecteurs. en sens horaire ($\tau_z < 0$).
La deuxième clé est l'équation 2.40 : (i) Résoudre le problème Nous obtenons Donc, FIGURE 2.45 τ Le schéma de la situation pour l'exemple 2.12 (réponse) Valider la réponse Décortiquer le problème τ Identifier les clés La première clé est que le moment de force tend à aligner sur le champ, donc le moment de force est Le moment de force est perpendiculaire au plan formé par et . Comme on a vu dans le tome 1, un moment de force horaire correspond à un moment de force dont la composante z est négative. 70 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES RÉSUMÉ RÉSUMÉ Dans ce chapitre, nous avons étudié la façon de calculer le champ électrique produit par des charges et la force exercée sur un objet chargé par un champ électrique. LES LOIS ET LES PRINCIPES Le champ électrique est produit par des charges électriques. Le champ est le médiateur de la force électrique entre les charges. Il est défini comme la force par unité de charge exercée sur une charge-test q_0 • Pour N charges ponctuelles, on utilise le principe de superposition: • Pour une distribution continue : Pour calculer le champ : • Pour une charge ponctuelle : • Une charge électrique dans un champ subit une force : où l'élément infinitésimal dq peut être exprimé en fonction d'une densité de charge : • L'accélération de la charge, lorsqu'elle ne subit que la force électrique : • Un dipôle dans un champ uniforme subit un moment de force, qui tend à aligner le moment dipolaire sur le champ τ × LES RÉSULTATS • Un dipôle est constitué d'une charge +q et par une charge −q, séparées par une distance d. Le moment dipolaire est Un dipôle produit un champ électrique. Pour r ≫ d, (sur l'axe) (sur la ligne bissectrice) • Un champ uniforme est produit par deux grandes plaques dont les charges surfaciques sont uniformes et opposées. QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 71 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Q questions qualitatives • E exercices simples • P problèmes • solution disponible Section 2.1 La notion de champ P6 Une petite sphère est suspendue au bout d'une corde. Q1 Déterminez l'orientation du champ électrique qui pro- La sphère a une charge de 2,50 μC et une masse de 20,0 g. Un champ électrique horizontal et uniforme est présent, de telle sorte que la corde forme un angle de 10,0° lorsque le système est en équilibre, comme l'illustre la figure 2.46.
Calculez le module du champ . duit les effets suivants : a. Un proton se déplace vers le haut, et le module de sa vi tesse est croissant. b. Un électron se déplace vers la droite, et le module de sa vitesse est décroissant. Section 2.2 Le champ de charges ponctuelles c. Une particule alpha (dont la charge est q = +2e) se déplace vers la gauche, et le module de sa vitesse est décroissant. charge ponctuelle q située à chacun de ses coins, comme le montre la figure 2.47. Quel est le champ électrique pour un point situé au centre du cube ?
d. Une particule dont la charge est négative se déplace vers le nord à vitesse constante.
Q7 Soit un cube dont les arêtes sont de longueur L. Il a une e. Une particule positive se déplace vers l'ouest, et le module de sa vitesse est croissant.
E2 Un électron se déplace dans un champ électrique de 150 N/C dans le sens de l'axe des x. Quelle est son accélération ? E3 Une petite bille chargée de 32 μC flotte au-dessus d'une grande plaque horizontale uniformément chargée qui produit un champ électrique uniforme. La bille a une masse de 2,8 g. a. Quelle est l'orientation du champ électrique produit par la plaque pour que la bille soit en équilibre ? b. Quel est le module du champ électrique ? ++ E4 Un ion Cu subit une force lorsqu'il se trouve dans un champ électrique. a. Quelle est la charge de l'ion, exprimée en coulombs ? b. Calculez le champ électrique. c. Calculez le module du champ électrique. P5 Une petite sphère est suspendue au bout d'une corde. La sphère a une charge q et une masse m. Un champ électrique horizontal et uniforme est présent, de telle sorte que la corde forme un angle θ lorsque le système est en équilibre, comme le montre la figure 2.46. Calculez le module du champ . FIGURE 2.47 • Question 7 Q8 La figure 2.48 illustre deux charges ponctuelles pla- cées sur l'axe des x. L'axe des x est divisé en trois régions : la région (i) à gauche des charges, la région (ii) entre les charges et la région (iii) à droite des charges. a. Quel est le sens du champ électrique résultant dans la région (i) ? b. Quel est le sens du champ électrique résultant dans la région (ii) ? c. Quel est le sens du champ électrique résultant dans la région (iii) ?
d.
Dans quelle région peut-on avoir un champ nul sans être à une distance infinie ? Expliquez votre réponse. e. Peut-on avoir un champ nul à un point qui n'est pas sur l'axe des x ? Expliquez votre réponse. FIGURE 2.48 • Question 8 Q9 La figure 2.49 (voir la page suivante) illustre deux situa- tions où deux charges ponctuelles sont placées sur l'axe des y, à une distance d, de part et d'autre de l'origine. Le point P est placé sur l'axe des x. Voici six énoncés : (i) Le champ électrique au point P est nul. (ii) Le champ au point P est orienté vers le haut. FIGURE 2.46 • Problèmes 5 et 6 (iii) Le champ au point P est orienté vers le bas. 72 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES (iv) Le champ au point P est orienté vers la droite. (v) Le champ au point P est orienté vers la gauche. (vi) Tous les autres énoncés sont faux.
Pour les situations suivantes, lequel des énoncés est vrai ? FIGURE 2.50 • Problème 14 a. Les charges sont positives et identiques. b. Les charges sont opposées. P15 La figure 2.51 montre un système de trois charges ponctuelles, avec $q_1 = 2{,}00$ μC, $q_2 = -2{,}00$ μC, $q_3 = 3{,}00$ μC, d = 3,00 cm et a = 10,0 cm. a. Déterminez le champ électrique produit à la position de q 3 par les deux autres charges. b. Quelle est la force électrique qui s'exerce sur q 3 ? (a) (b) FIGURE 2.49 • Question 9 E10 Une charge ponctuelle positive q = 3,0 μC est située à a.
Quel est le vecteur Un point P se trouve à la position ? FIGURE 2.51 • Problème 15 b. Calculez le champ électrique au point P. E11 Un point P est situé à (0,300 ; 0,300 ; 0,300) m. Une charge ponctuelle q = −4,50 μC est située à (−0,150 ; 0,250 ; −0,200) m. a. Calculez le vecteur . b. Quel est le champ électrique au point P ? P16 Dans la figure 2.52, une charge ponctuelle $q_1 = 4{,}00$ μC et une charge ponctuelle $q_2 = -6{,}00$ μC se trouvent sur l'axe des x.
a. Calculez le champ électrique au point P. b. Trouvez la force résultante exercée sur une charge ponctuelle q 3 = −3,00 μC si on la place au point P. c. Calculez le module du champ électrique au point P. P12 Un charge ponctuelle $q_1 = 5{,}00$ μC est située à la position et une deuxième charge ponctuelle $q_2 = -7{,}00$ μC est située à la position . Un point P se trouve à la coordonnée (3,00 ; 8,00) cm. a. Calculez le champ électrique résultant produit par les deux charges au point P. b. Calculez le champ électrique au point P si on ajoute une charge q 3 = −3,00 μC à l'origine. P13 Une charge ponctuelle $q_1 = 24{,}0$ nC est placée à 6,00 cm d'une autre charge ponctuelle $q_2 = -12{,}0$ nC. Les deux charges sont placées sur l'axe des x. À quel endroit le champ électrique est-il nul ? Exprimez votre réponse en fonction de la position de q1. FIGURE 2.52 • Problème 16 P17 Calculez le champ électrique au point P illustré à la figure 2.53. P14 Deux charges sont situées sur l'axe des x, comme le montre la figure 2.50 : la charge $q_1 = -2{,}00$ μC est en x 1 = 2,00 cm, et la charge $q_2 = -3{,}00$ μC est en x 2 = 5,00 cm. Où doit-on placer une charge $q_3 = 5{,}00$ μC pour que le champ soit nul à l'origine ? FIGURE 2.53 • Problème 17 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES P18 Trois charges ponctuelles sont placées comme le montre la figure 2.54. Si $q_1 = 17{,}0$ nC, $q_2 = -23{,}0$ nC, $q_3 = -19{,}0$ nC, a = 3,40 cm et b = 1,40 cm, calculez : a. le champ électrique au point P ; b. la force sur une charge $q_4 = -11{,}0$ nC placée au point P. 73 de deux protons à la position à mi-chemin entre les deux atomes d'hydrogène, quel serait le module du moment dipolaire électrique de la molécule dans ce modèle ? b. Selon la valeur donnée à l'exemple 2.12, est-ce que notre modèle est représentatif de la réalité ? FIGURE 2.56 • Exercice 21 E22 Un dipôle est formé d'une charge positive de 3,5 μC en FIGURE 2.54 • Problème 18 P19 On place les charges $q_1 = 1{,}4$ μC et $q_2 = -2{,}3$ μC sur les coins d'une boîte, comme il est illustré à la figure 2.55. Les dimensions de la boîte sont e = 4,5 cm, L = 8,0 cm et h = 6,0 cm. a. Calculez le champ électrique au point P. b. Calculez le module du champ au point P. en ce dipôle. et d'une charge négative de −3,5 μC . Calculez le moment dipolaire de E23 Un dipôle est constitué de deux charges $q_1 = 1{,}0$ nC et $q_2 = -1{,}0$ nC séparées par une distance de 1,30 mm. Le dipôle est centré à l'origine, avec le moment dipolaire orienté dans le même sens que l'axe des z. Un point P est situé à la position a. Calculez le champ électrique au point P. b. Quelle est la force électrique exercée sur un électron qui se trouve à la position du point P ? P24 Montrez que pour des points situés à une distance r ≫ d, le champ électrique sur la ligne bissectrice d'un dipôle est donné par : Section 2.4 Les distributions continues de charge Q25 Une tige de longueur L a une charge Q uniformément FIGURE 2.55 • Problème 19 P20 Une charge ponctuelle $q_1 = 4{,}50$ μC se trouve à la distribuée. On veut calculer le champ électrique au point P, situé à une distance d à droite de l'origine, comme il est illustré à la figure 2.57. position Une deuxième charge ponctuelle $q_2 = -2{,}30$ μC se trouve à la position Un électron se trouve à la position a. Calculez, à la position de l'électron, le champ électrique produit par les deux autres charges ponctuelles.
b. Quelle est l'accélération de l'électron ? Section 2.3 Le champ électrique d'un dipôle E21 La géométrie de la molécule d'eau est présentée à FIGURE 2.57 • Question 25 a. Écrivez une expression pour l'élément dq en fonction de la charge de la tige. la figure 2.56. La distance entre l'atome d'oxygène et un atome d'hydrogène est $r = 0{,}958\,4 \times 10^{-10}$ m, et l'angle formé par les deux atomes d'hydrogène est θ = 104,45°. b.
Écrivez une expression pour le vecteur unitaire a. Si on modélise la molécule d'eau comme étant un dipôle de deux électrons à la position de l'atome d'oxygène et d. Écrivez l'intégrale nécessaire pour calculer résoudre.
. c. Quelle est la distance r entre l'élément dq illustré et le point P ? , sans la 74 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Q26 On veut calculer le champ électrique au point P situé à une distance y au-dessus de l'extrémité d'une tige (voir la figure 2.58). La tige a une charge linéique λ uniforme et une longueur L. a. Écrivez une expression pour l'élément dq en fonction de la charge linéique de la tige.
b. Écrivez une expression pour le vecteur unitaire . c. Quelle est la distance r entre l'élément dq illustré et le point P ? FIGURE 2.60 • Question 28 d. Écrivez l'intégrale nécessaire pour calculer résoudre. E29 Une tige de longueur L est parallèle à l'axe des x, et , sans la son extrémité gauche est à une distance d de l'origine d'un système de coordonnées cartésiennes (voir la figure 2.61). Sa charge linéique est donnée par λ = a/(d + x), où a est une constante. Calculez la charge de la tige. FIGURE 2.58 • Question 26 Q27 Une tige de longueur L a une charge Q uniformément distribuée. On veut calculer le champ électrique au point P, situé à une distance d à droite de l'origine, comme le montre la figure 2.59. FIGURE 2.61 • Exercice 29 P30 Un fil uniformément chargé a une longueur de 6,00 m et une charge de −360 μC. Calculez le champ électrique en un point P1 situé à droite du fil à une distance d = 5,00 m du centre (voir la figure 2.62). FIGURE 2.59 • Question 27 a. Écrivez une expression pour l'élément dq en fonction de la charge de la tige. b. Écrivez une expression pour le vecteur unitaire . c. Quelle est la distance r entre l'élément dq illustré et le point P ?
FIGURE 2.62 • Problèmes 30 et 31 P31 Un fil uniformément chargé a une longueur de 6,00 m , sans la et une charge de 360 μC. Calculez le champ électrique à un point P2 situé vis-à-vis du centre du fil, à une distance R = 2,00 m (voir la figure 2.62). Q28 On courbe une tige en forme de demi-cercle de rayon R, P32 Un fil infini a une charge linéique λ uniforme. Mon- comme il est illustré à la figure 2.60. La charge linéique λ est uniforme. trez que le module du champ électrique à une distance R au-dessus du fil est : d. Écrivez l'intégrale nécessaire pour calculer résoudre. a. Écrivez une expression pour l'élément dq en fonction de la charge linéique et du rayon du demi-cercle. b. Écrivez une expression pour le vecteur unitaire c. Écrivez l'intégrale nécessaire pour calculer résoudre. . , sans la P33 Un fil uniformément chargé a une longueur de 6,00 m et une charge de 360 μC. Une charge q = 70,0 nC est placée comme le montre la figure 2.63.
QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES a. Calculez le champ électrique produit par le fil à la position de la charge q. b. Calculez la force électrique exercée sur la charge q par le fil. 75 P38 Deux tiges parallèles de longueur L et de charge liné- ique λ sont séparées par une distance d (voir la figure 2.66). Les points P1 et P2 sont à mi-chemin entre les deux tiges. a. Quel est le champ électrique au point P1, situé vis-à-vis du centre de chaque tige ? b. Quel est le champ électrique au point P2 ? FIGURE 2.63 • Problème 33 P34 Une tige en forme de demi-cercle de rayon R a une charge linéique λ. Quel est le module du champ électrique au centre du demi-cercle ? FIGURE 2.66 • Problème 38 P35 Une tige en forme de demi-cercle ayant un rayon de P39 Une tige verticale de 3,00 m, possédant une charge liné- 25,0 cm a une charge linéique de 350 μC/m. Quel est le module du champ électrique au centre du demi-cercle ? P36 Une tige est courbée en forme d'arc de cercle, comme le montre la figure 2.64. La tige a une charge de 360 μC uniformément distribuée et un rayon de 0,200 m. Quel est le champ électrique produit par la tige au point P ? ique de −15,04 μC/m, est située à x = 0,00 m. Une tige horizontale de 4,00 m possédant une charge linéique de 32,0 μC/m est située à y = 3,00 m, comme le montre la figure 2.67. Quel est le champ produit par les deux tiges à l'origine ? FIGURE 2.67 • Problème 39 FIGURE 2.64 • Problème 36 P37 Une tige rectiligne uniformément chargée de charge totale +Q est recourbée en forme d'arc de cercle de rayon R (voir la figure 2.65). Les deux extrémités de la tige forment un angle θ et celle-ci est centrée sur l'axe des x. Quel est le champ électrique au point P? P40 Une tige verticale uniformément chargée (Q = 250 nC) est située à x = 0,00 cm entre les positions y = −8,00 cm et y = −2,00 cm. Dans le même système, une charge ponctuelle positive $q_1 = 76{,}0$ nC est placée à la coordonnée (3,00 ; −2,00) cm. a. Calculez le champ électrique à l'origine. b. Une charge ponctuelle négative $q_2 = -120$ nC est placée à l'origine. Quelle est la force électrique qui s'exerce sur la charge q2 ? Section 2.5 Le champ produit par les anneaux, les disques et les plans Q41 La figure 2.68 (voir la page suivante) montre deux anneaux de rayon R identiques, partageant le même axe et séparés par une distance 2R, et trois points sur l'axe : le point P1 est à mi-chemin entre les anneaux, P2 est au FIGURE 2.65 • Problème 37 76 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES centre de l'anneau supérieur et P3 est à une distance R audessus de l'anneau supérieur. Classez les points par ordre décroissant du module du champ électrique dans les situations suivantes : P45 Un disque de rayon R est percé d'un trou de rayon R/4. Les deux anneaux ont la même charge positive. b. au point P2 situé à une distance R sur l'axe du disque. à son centre (voir la figure 2.70). Le disque a une charge surfacique σ. Calculez le champ aux endroits suivants : a. au point P1 situé au centre du trou ; b. Les deux anneaux ont des charges de valeurs opposées. FIGURE 2.70 • Problème 45 FIGURE 2.68 • Question 41 E42 Un anneau de 30,0 cm de rayon est situé au dessus d'un autre anneau de 45,0 cm de rayon. Les deux anneaux sont séparés par une distance d = 60,0 cm et ils par tagent le même axe, comme le montre la figure 2.69. Si l'anneau supérieur a une charge $Q_1 = 120$ μC, et l'anneau inférieur a une charge Q 2 = −360 μC, calculez le champ électrique au point P à michemin entre les deux anneaux. Section 2.6 Les lignes de champ Q46 La figure 2.71 montre un électron qui se déplace du point a au point b ainsi que des lignes de champ électrique. a.
Quelle est l'orientation du champ électrique à chaque point ? b. Quelle est l'orientation de la force électrostatique sur l'élec tron à chaque point ?
c. À quel point le module du champ estil plus grand ? FIGURE 2.71 • Question 46 Q47 D'après les lignes de champ illustrées à la figure 2.72, quelle est la charge q1 si q2 = 6 μC ? FIGURE 2.69 • Exercice 42 E43 Deux plaques isolantes parallèles sont séparées par une distance de 30 cm. La plaque inférieure (plaque 2) a une charge surfacique de 36 μC/m2. a. Quelle doit être la charge surfacique de la plaque su périeure (plaque 1) pour que le champ entre les plaques soit nul ? b. On ajoute une troisième plaque isolante à une distance de 50 cm audessus de la plaque supérieure (plaque 1). La charge surfacique de cette troisième plaque est de −12 μC/m2. Quelle doit être la nouvelle charge surfacique de la plaque 1 pour que le champ électrique entre les plaques 1 et 2 soit nul ? P44 Un anneau a un rayon R et une charge Q uniformé FIGURE 2.72 • Question 47 Q48 Tracez les lignes de champ des systèmes de particules suivants : a. b. ment distribuée. Son axe correspond à l'axe des z. a. À quel endroit sur l'axe de l'anneau le module du champ électrique estil maximal ? b. Quel est le module du champ à cet endroit ?
c. QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Section 2.7 Le mouvement d'une charge ponctuelle dans un champ électrique Q49 Des particules se déplacent dans une région où le champ électrique est uniforme. Indiquez comment va chan ger la vitesse (augmentation du module, diminution du mo dule ou changement d'orientation) des particules suivantes. a. Un électron se déplace perpendiculairement au champ électrique. b. Un électron se déplace dans le sens opposé au champ électrique. c. Un électron se déplace dans le même sens que le champ électrique. d. Un proton se déplace dans le sens opposé au champ électrique. 77 E54 La charge élémentaire a été mesurée par le physicien américain Robert Millikan (1868-1953) entre 1910 et 1913. Il a utilisé un appareil qui vaporise de l'huile en fines gouttelettes qui deviennent alors chargées. Les gouttelettes entrent ensuite dans une chambre où il y a deux plaques chargées parallèles, produisant un champ électrique uniforme (voir la figure 2.73). Les gouttelettes sont soumises à trois forces verticales : la force gravitationnelle, la force électrostatique et la poussée d'Archimède qu'on va négliger ici. Dans une telle expérience, le champ électrique est nécessaire pour qu'une gouttelette ayant un rayon de 1,32 μm et une masse volumique de 0,850 g/cm3 soit en équilibre (on suppose que les gouttelettes sont sphériques). Quelle est la charge de la gouttelette ? Exprimez votre réponse en fonction de la charge élémentaire. e. Un proton se déplace dans le même sens que le champ électrique. f. Un proton de déplace perpendiculairement au champ électrique. E50 Une particule chargée q = 52,0 μC, ayant une masse de $1{,}27 \times 10^{-3}$ kg, entre dans un champ électrique uniforme .
Quelle accélération va-t-elle subir ? E51 Un électron initialement au repos se trouve à une dis- tance de 1,20 cm d'une grande plaque chargée. L'électron accélère vers la plaque et la frappe après un intervalle de temps de 7,39 ns. a. Quel est le module de l'accélération de l'électron ? b. Quel est le module de la vitesse de l'électron tout juste avant de frapper la plaque ? c. Quel est le module du champ électrique ? d. Quelle est la charge surfacique de la plaque chargée ? FIGURE 2.73 • Exercice 54 P55 Un champ uniforme est présent entre deux plaques parallèles ayant 4,00 cm de longueur (voir la figure 2.74). Un proton est projeté à mi-chemin entre les deux plaques avec une vitesse de $8{,}00 \times 10^5$ m/s orienté selon un angle de 30,0° vers le haut. a. Calculez les composantes cartésiennes de la vitesse du proton à la sortie des deux plaques. b. Trouvez la composante verticale du déplacement du proton au moment où celui-ci sort de la région entre les plaques. E52 Une particule alpha est un noyau d'hélium ayant une masse de $6{,}648 \times 10^{-27}$ kg et constitué de deux protons et deux neutrons sans électron. Une particule alpha est lancée à une vitesse initiale de dans un champ électrique uniforme de a. Quelle distance la particule alpha va-t-elle parcourir avant de s'immobiliser ? b. Combien de temps prendra-t-elle pour s'arrêter ? FIGURE 2.74 • Problème 55 E53 En 1913, le physicien danois Niels Henrik David Bohr (1885-1962) a proposé un modèle pour l'atome d'hydrogène dans lequel l'électron parcourt une trajectoire circulaire autour du proton immobile. Dans ce modèle, le plus petit rayon orbital (le rayon de Bohr) est d'environ 53 pm. Quel est le module de la vitesse orbitale de l'électron ? P56 Dans une imprimante à jet d'encre, les gouttelettes d'encre sont déviées par un champ électrique uniforme produit par deux plaques parallèles vers la position désirée sur une feuille de papier. Une gouttelette a une charge de $1{,}2 \times 10^{-13}$ C et une masse de $1{,}3 \times 10^{-10}$ kg. Elle pénètre entre les plaques avec une vitesse horizontale de 21 m/s. Les 78 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES plaques ont une longueur de 1,6 cm (voir la figure 2.75). À la sortie des plaques, le déplacement vertical de la gouttelette est de Quel est le champ électrique entre les plaques ? P58 Un électron est lancé avec une vitesse de 3 500 km/s selon un angle de 30,00° au-dessus de l'horizontale, dans une région où existe un champ électrique de produit par deux plaques distantes de 2,000 cm et dont la longueur est de 10,00 cm. L'électron commence son parcours au coin inférieur gauche du système de plaques. a. Est-ce que l'électron frappera l'une ou l'autre des plaques ? Si oui, indiquez laquelle. FIGURE 2.75 • Problème 56 P57 Dans un tube à rayons cathodiques (utilisé dans les oscilloscopes et les anciens téléviseurs), des électrons, initia lement au repos, sont d'abord accélérés par deux plaques parallèles P 1, puis ils sont déviés par deux autres plaques parallèles P 2. Ensuite, ils continuent en ligne droite jusqu'à un écran fluorescent, comme le montre la figure 2.76. Entre les plaques P 1, il y a un champ qui accélère les électrons sur une distance d = 1,00 cm. Les plaques P 2 ont une longueur = 2,15 cm, et le champ électrique est de . L'écran est situé à une distance L = 24,0 cm après la fin des plaques P 2. (Négligez la force gravitationnelle.) a. Quelle est la vitesse des électrons après les plaques P 1 ? b. Quelle est la vitesse des électrons après les plaques P 2 ? c. Quel est le déplacement vertical total des électrons lorsque ces derniers frappent l'écran ? FIGURE 2.76 • Problème 57 b. S'il en frappe une, où le fera-t-il ? S'il n'en frappe aucune, quel est son déplacement vertical à la sortie des deux plaques ? Section 2.8 Un dipôle dans un champ électrique Q59 Quel est l'angle entre le champ électrique et le moment dipolaire d'un dipôle pour que le moment de force ait un module maximal ? E60 Une molécule d'eau a un moment dipolaire de $6{,}17 \times 10^{-30}$ C · m. Quel est le module du moment de force maximal que subit la molécule lorsque celle-ci se trouve dans un champ électrique ? P61 Un dipôle formé d'une charge positive de 5,0 μC en en dipôle. et d'une charge négative de −5,0 μC est situé dans un champ électrique . Calculez le moment de force exercé sur le SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 79 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 2.1 a. Vers la gauche b. Vers la gauche La force est de sens opposé au champ électrique lorsque la charge est négative, car . La vitesse n'est pas un facteur. c.
Vers le bas d. Vers la droite e. Vers la droite La force a la même orientation que le champ pour une charge positive, car . La vitesse n'est pas un facteur. f.
Vers le haut 2.2 a. b. Comme la charge est uniformément distribuée, la charge linéique est une constante. ; 2.3 a. b. E1 = E 2 = E 3 Comme charge avec et . , on a et . On trouve la Le champ est orienté vers le plan, car il est chargé négativement. Le champ produit par un plan infini uniformément chargé est uniforme, donc le module ne change pas d'un point à l'autre. 2.4 (ii = iii = iv) > (i = v) Le champ est uniforme entre les plaques (points ii, iii et iv), et il est nul à l'extérieur des plaques (points i et v).
2.5 a. $q_1 > 0$ et $q_2 < 0$ Des lignes sont issues de q1, donc le signe est positif. Des lignes s'arrêtent sur q2, donc le signe est négatif.
b.
$|q_1|/|q_2| = 2/3$ La charge d'un objet est proportionnelle au nombre de lignes issues de la charge ou qui arrivent sur l'objet.
Chapitre 80 Le théorème de Gauss Buts du chapitre Ce chapitre présente une autre méthode permettant de calculer le champ électrique. Après l'étude de ce chapitre, vous serez en mesure : • d'utiliser la symétrie pour obtenir l'orientation du champ électrique ; • de calculer le flux électrique à travers une surface ; • d'appliquer le théorème de Gauss afin de déterminer le module du champ électrique pour certaines configurations ; • d'obtenir les propriétés des conducteurs en équilibre électrostatique ; • de calculer le champ à l'intérieur d'un diélectrique. Préalables Ce chapitre poursuit l'étude du champ électrique. Revoyez : • le champ électrique, étudié aux sections 2.1 et 2.2 ; • les lignes de champ électrique, abordées à la section 2.6 ; • les isolants et les conducteurs, présentés à la section 1.3. 81 La personne dans la cage ne ressent pas l'arc électrique, car elle est protégée par la cage de Faraday. 82 CHAPITRE 03 — Le théorème de Gauss UN PEU D'HISTOIRE Gauss, les mathématiques pures et la science appliquée En 1808, les troupes de Napoléon occupent la ville allemande de Göttingen. Une contribution financière est requise de ses habitants. Le nouveau directeur de l'observatoire fait appel à deux illustres mathématiciens français qui paient à sa place.
Pourquoi ? Ce savant dans la trentaine passe déjà pour le plus grand mathématicien d'Europe. C'est Carl Friedrich Gauss. Fils d'un jardinier et d'une mère illettrée, Gauss fait preuve d'un talent si précoce dans tous les domaines que le seigneur de sa ville natale l'aide à fréquenter l'école et même l'université, où il se consacre aux mathématiques. Appelé de son vivant le « prince des mathématiciens », il ne craindra jamais de passer de la théorie à la pratique. Gauss devient célèbre en retrouvant une planète perdue. En 1801, l'Italien Giuseppe Piazzi est le premier astronome à observer l'astéroïde Cérès. Aujourd'hui considérée comme une planète naine, elle est prise à l'époque pour une nouvelle planète. Pour la repérer de nouveau, il faut se tourner vers Gauss qui parvient à calculer son orbite à partir d'un petit nombre d'observations, en utilisant une nouvelle méthode mathématique dite des moindres carrés. Quand Cérès est retracée, c'est le début d'une carrière éblouissante. En mathématiques, Gauss soumet des preuves brillantes du théorème fondamental de l'algèbre, il aborde les nombres complexes et il envisage des géométries non euclidiennes.
Il contribue aussi à la théorie de l'astronomie et collabore à l'arpentage du territoire allemand. En physique, Gauss révolutionne l'étude du magnétisme terrestre. Même si Coulomb avait démontré que la force entre deux pôles magnétiques varie selon le carré inverse de leur séparation, il restait à quantifier plusieurs autres propriétés magnétiques. En 1831, la découverte de l'induction par Faraday stimule l'intérêt de Gauss ; ce dernier accueille alors avec joie un nouveau professeur de physique à Göttingen : Wilhelm Eduard Weber. L'alliance du savoir-faire expérimental de Weber et du génie mathématique de Gauss entraîne la création de nouveaux instruments. Les deux savants organisent un réseau d'observatoires magnétiques à l'échelle planétaire, et ils en construisent un à Göttingen. Dans tout l'édifice, le cuivre est substitué au fer pour que rien n'affecte les déterminations du module et de l'orientation du champ magnétique. Les mesures affluent de l'ensemble de ces observatoires et permettent de mieux cerner l'électromagnétisme. Gauss et Weber concluent qu'il n'existe pas de monopôle magnétique, et ils énoncent un principe important : le flux d'un champ électrique qui traverse une surface fermée est proportionnel à la charge électrique totale qu'elle contient. Le concept même de potentiel magnétique est une autre contribution durable du mathématicien, qui s'inspire de son collègue français Siméon Poisson. Gauss prédit même – correctement – l'emplacement des pôles magnétiques de la Terre. En 1833, Gauss et Weber construisent un des premiers télégraphes électromagnétiques à Göttingen. Quoique leur appareil soit trop coûteux et délicat, il fait partie de la première vague d'applications pratiques de l'électricité. L'utilisation de l'électricité à des fins médicales remontait au 18e siècle et les médecins du 19e siècle exploitent des inventions électriques pour traiter des troubles musculaires, cautériser des blessures ou tenter de repérer des balles à l'intérieur du corps. La galvanoplastie est plus lucrative encore. Dès 1837, le principe est connu : coupler une anode métallique à une cathode constituée d'un objet conducteur qu'on désire recouvrir du métal de l'anode. En faisant passer un courant, on peut plaquer d'argent de la vaisselle et des ustensiles, par exemple. L'arc électrique, lui, est adapté à l'illumination de monuments, de chantiers et de pièces de théâtre à partir de 1847, au moment où la télégraphie électrique s'impose. Jusqu'à l'invention de la dynamo, l'utilisation obligée de piles ou d'accumulateurs limitera cependant l'intérêt des applications de l'électricité. Lorsque Gauss s'éteint, en 1855, le prince des mathématiciens aura démontré l'utilité des mathématiques dans une variété de domaines, de l'astronomie à la télégraphie. Carl Friedrich Gauss (1777-1855) 3.1 — La symétrie 83 Le champ électrique est le médiateur de la force électrique.
Nous avons expliqué, au chapitre précédent, la méthode pour le calculer à l'aide du calcul intégral. Cette méthode est basée sur la loi de Coulomb et le principe de superposition. Dans ce chapitre, nous utilisons une autre méthode pour calculer le champ électrique, basée sur le théorème de Gauss et le principe de symétrie. Nous allons voir que lorsqu'une distribution de charges possède un haut degré de symétrie, il est possible d'obtenir très facilement le champ électrique. Cette méthode va nous permettre d'obtenir le champ électrique pour des configurations importantes telles que les sphères, les cylindres infinis et les plans infinis. Lorsque les charges sont immobiles, la loi de Coulomb et le théorème de Gauss sont équivalents, car on peut obtenir la loi de Coulomb à partir du théorème de Gauss ou démontrer le théorème de Gauss à partir de la loi de Coulomb.
Par contre, la loi de Coulomb s'applique uniquement en électrostatique, alors que le théorème de Gauss demeure valable lorsque les charges sont en mouvement. Le théorème de Gauss est plus général que la loi de Coulomb. Nous allons également analyser le champ électrique produit par des conducteurs en équilibre électrostatique et dans les isolants, aussi appelés les diélectriques. Le théorème de Gauss va nous permettre d'obtenir certaines propriétés générales. Entre autres, nous verrons que l'intérieur d'un conducteur est isolé des champs électriques extérieurs. La photographie de l'ouverture du chapitre montre un exemple où une personne est en sécurité à l'intérieur d'une cage métallique, qu'on appelle cage de Faraday. 3.1 La symétrie Nous avons vu que le champ électrique est produit par les charges électriques. Il est possible d'obtenir la forme des lignes de champ lorsqu'une distribution a un haut degré de symétrie. La figure 3.1 montre une très longue tige uniformément chargée, que l'on considère comme infinie. Une symétrie est une transformation géométrique qu'on effectue sur la distribution et qui ne change pas son aspect. Si vous fermez les yeux et qu'on déplace la tige le long de son axe, vous ne verrez pas de différence. FIGURE 3.1 Une tige infinie uniformément chargée a une symétrie cylindrique. La figure 3.2 illustre les quatre transformations de symétrie de la tige : • une translation le long de l'axe (figure b) ; • une rotation autour de l'axe (figure c) ; • une réflexion le long d'un plan qui inclut l'axe (figure d) ; • une réflexion le long d'un plan perpendiculaire à l'axe (figure e). (a) FIGURE 3.2 Les transformations de symétrie pour un cylindre infini (b) (c) (d) (e) 84 CHAPITRE 03 — Le théorème de Gauss Une configuration de charges qui reste inchangée après ces transformations possède une symétrie cylindrique. Les différentes transformations de symétrie ne changent pas la distribution de charges, ce qui implique que le champ électrique ne change pas au cours des transformations de symétrie. Le champ électrique doit présenter la même symétrie que la distribution de charges. Ce résultat restreint grandement la forme du champ électrique possible. Par exemple, la figure 3.3a montre une configuration cylindrique avec le champ électrique qui change le long de l'axe du cylindre. La figure 3.3b montre le même cylindre après une translation le long de son axe.
Le champ électrique est différent, ce qui est incompatible avec la symétrie. Donc, le module du champ doit être le même pour tous les points situés à une même distance de l'axe du cylindre. FIGURE 3.3 Une translation du cylindre par rapport à son axe change la forme du champ électrique, ce qui est incompatible avec la symétrie de la distribution. Ce champ n'est pas possible. La figure 3.4a montre une vue en coupe d'un cylindre, avec un champ électrique hypothétique. Si on fait une rotation de 45°, on obtient la figure 3.4b ; le champ n'est pas le même qu'avant la rotation. Le champ n'est pas compatible avec la symétrie, ce qui indique que ce champ n'est pas possible. Le champ doit avoir le même module à tous les angles autour du cylindre. Observons maintenant ce qu'implique la symétrie dans le cas d'une réflexion. La figure 3.5a illustre le cylindre avec un champ électrique oblique. Si on effectue une réflexion par rapport à la ligne pointillée, on obtient la situation de la figure 3.5b ; encore une fois, le champ a changé, ce qui n'est pas compatible avec la symétrie. Le champ illustré n'est pas possible. Par conséquent, la symétrie cylindrique implique que le champ doit être perpendiculaire à l'axe du cylindre, et que son module doit être le même pour tous les points situés à la même distance de cet axe. La figure 3.6 illustre la seule forme FIGURE 3.4 Une rotation permet de voir que le champ illustré n'est pas possible, car il ne respecte pas la symétrie. FIGURE 3.5 Une réflexion selon le plan indiqué change la forme du champ électrique, ce qui est incompatible avec la symétrie de la distribution. Ce champ n'est pas possible. 3.1 — La symétrie 85 FIGURE 3.6 La symétrie cylindrique impose l'orientation du champ électrique. de champ électrique qui respecte la symétrie cylindrique. Ce champ a une orientation radiale vers l'extérieur. La symétrie ne donne pas le module du champ, mais l'orientation du champ est connue. Deux autres symétries permettent d'obtenir l'orientation du champ électrique : la symétrie sphérique et la symétrie plane. Une sphère uniformément chargée est un exemple d'une configuration à symétrie sphérique. Les transformations de symétrie sont les suivantes : • les rotations autour d'un axe qui passe par le centre ; • les réflexions par rapport à un plan qui inclut le centre. Comme le montre la figure 3.7, le champ électrique doit être radial et avoir le même module pour tous les points situés à une même distance du centre. FIGURE 3.7 Pour une distribution à symétrie sphérique, le champ est radial.
Nous avons rencontré une symétrie plane lors de l'étude du plan infini à la section 2.5. Les transformations de symétrie sont les suivantes : • les translations parallèles au plan chargé ; • les réflexions par rapport au plan chargé ; • les réflexions par rapport à un plan perpendiculaire au plan chargé. Le champ électrique doit donc être en direction normale (perpendiculaire) au plan et avoir le même module pour tous les points à la même distance du plan, comme le montre la figure 3.8. Les résultats de la symétrie cylindrique et de la symétrie plane s'appliquent uniquement dans le cas de cylindres infinis et de plans infinis, ce qui n'existe pas dans la vie réelle. Par contre, ces résultats sont de bonnes approximations dans les situations où on a besoin du champ électrique pour des points à faible distance et éloignés des extrémités de cylindres ou de plans. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 3.1 La figure ci-dessous présente une coupe en deux dimensions de sphères uniformément chargées et des champs hypothétiques. Indiquez quelle transformation de symétrie permet de conclure que les champs ne sont pas possibles. a. b. FIGURE 3.8 Pour une distribution à symétrie plane, le champ est normal au plan. 86 CHAPITRE 03 — Le théorème de Gauss 3.2 Le flux électrique Le concept de flux Le principe de symétrie permet d'obtenir l'orientation du champ électrique, mais ne donne pas la variation du module du champ lorsqu'on s'éloigne d'une distribution. Pour obtenir cette information, on doit d'abord définir une quantité scalaire qui dépend du champ électrique, qu'on appelle le flux électrique. Pour comprendre cette notion, nous allons d'abord étudier le flux pour un système plus facile à visualiser : de l'eau qui coule. Supposons un ruisseau dans lequel coule de l'eau de façon constante. On peut caractériser l'écoulement d'eau par un champ vectoriel, la vitesse de l'eau. On suppose que l'écoulement est uniforme, ce qui implique que le vecteur ne change pas d'un point à l'autre du ruisseau. On place un cadre d'aire A dans l'eau, comme le montre la figure 3.9. Pour décrire l'orientation du cadre, on définit le vecteur unitaire normal , un vecteur perpendiculaire au plan du cadre. Dans la figure 3.9a, le plan du cadre est perpendiculaire à la vitesse d'écoulement (le vecteur est parallèle à), et l'écoulement d'eau à travers le cadre est maximal. Le flux associé au vecteur vitesse est représenté par Φ_v (la lettre grecque phi majuscule, avec un indice pour indiquer qu'il est associé à). Il est donné par l'expression : Une vitesse (en m/s) qui multiplie une aire (en m2) a pour résultat un volume par unité de temps en m3/s. Donc, le flux Φ_v représente le débit volumique d'eau qui traverse le cadre. À la figure 3.9b, le plan du cadre est parallèle à la vitesse d'écoulement (est perpendiculaire à). Dans ce cas, le flux est nul, car l'eau ne traverse pas le cadre. On voit que l'orientation du cadre par rapport à la vitesse d'écoulement agit sur le flux, le volume d'eau par unité de temps qui passe à travers le cadre. Pour une orientation quelconque du cadre de la figure 3.9c, on peut décomposer le vecteur vitesse selon une composante , parallèle au cadre, et une composante , perpendiculaire au cadre.
Seule la composante perpendiculaire au cadre (et parallèle au vecteur) contribue au flux : (3.1) où θ est l'angle entre les vecteurs et . Le flux est maximal pour θ = 0°, c'estàdire lorsque la vitesse est parallèle au vecteur normal, alors que le flux est nul (a) (b) (c) FIGURE 3.9 Le flux d'eau à travers le cadre dépend de l'orientation du cadre par rapport à la vitesse de l'eau. 3.2 — Le flux électrique lorsque θ = 90°, ce qui correspond à la situation illustrée à la figure 3.9b, avec la vitesse perpendiculaire au vecteur normal. REMARQUE Il y a une ambiguïté en ce qui concerne le sens du vecteur . Pour l'instant, nous choisissons le sens afin que $0° \leq \theta \leq 90°$. Nous verrons plus tard comment éviter cette ambiguïté. L'équation 3.1 ressemble au résultat d'un produit scalaire entre deux vecteurs. C'est le cas si on définit le vecteur aire comme un vecteur dont le module est l'aire du cadre et dont l'orientation est perpendiculaire au plan du cadre. La figure 3.10 donne deux exemples de vecteurs . Selon cette définition, le flux de l'eau à travers un cadre est (3.2) FIGURE 3.10 Deux exemples du vecteur Cette équation est valide pour n'importe quelle surface traversée par le courant d'eau, pas nécessairement un cadre placé dans l'eau. Le flux électrique pour un champ uniforme Le champ électrique est aussi un champ vectoriel. On peut définir le flux électrique de la même façon qu'on a défini le flux associé à la vitesse d'écoulement. La figure 3.11 montre un champ électrique uniforme qui traverse une surface d'aire A, décrite par le vecteur perpendiculaire à la surface. Le flux électrique est (3.3) Dans le SI, le flux électrique est mesuré en N · m2/C. Pour l'écoulement d'eau, le flux représente le volume d'eau qui traverse la surface par unité de temps. On peut se demander ce que représente le flux électrique. Le champ électrique n'est pas un fluide qui coule. C'est ici que le concept de lignes de champ électrique est utile. Selon ce qu'on a vu à la section 2.6, la densité de lignes de champ (le nombre de lignes par unité d'aire) est proportionnelle au module du champ. Si on multiplie le champ par l'aire, on trouve un nombre proportionnel au nombre de lignes. De façon qualitative, on obtient donc ce qui suit. Le flux électrique à travers une surface est proportionnel au nombre de lignes de champ électrique qui traversent cette surface. FIGURE 3.11 Le calcul du flux électrique pour un champ uniforme 87 88 CHAPITRE 03 — Le théorème de Gauss Ceci est illustré à la figure 3.12. Pour faire le calcul du flux, nous allons utiliser les vecteurs champ électrique, mais pour visualiser le flux, nous allons uti liser les lignes de champ.
(a) (b) (c) FIGURE 3.12 Le flux électrique est proportionnel au nombre de lignes de champ qui traversent la surface. (a) Cinq lignes de champ traversent la surface A1. (b) La surface A 2 est plus petite ; seulement trois lignes la traversent.
(c) La surface A 3 est inclinée ; seulement deux lignes la traversent. Alors, $\Phi_a > \Phi_b > \Phi_c$. Le flux électrique pour un champ non uniforme FIGURE 3.13 La surface est divisée en éléments pour le calcul du flux. L'équation 3.3 est valable uniquement lorsque le champ est uniforme, c'est àdire que ce dernier est le même pour tous les points de la surface.

Comment faiton pour calculer le flux lorsque le champ n'est pas le même le long de la surface ? La méthode consiste à diviser la surface en petits éléments de sur face , comme le montre la figure 3.13, à calculer le flux à travers ces surfaces et à faire la somme des flux.
Comme le flux est un scalaire, la somme est plus simple à calculer que dans le cas d'une quantité vectorielle comme le champ électrique.
À la figure 3.13, nous avons illustré deux éléments de surface, qu'on dénote par leur vecteur aire et . Ces éléments de surface sont suffisamment petits pour que le champ ne change pas le long de ces surfaces. Le flux électrique à travers l'élément est Le flux à travers les autres surfaces se calcule de la même façon. On obtient le flux à travers la surface complète en faisant la somme de tous les flux Φ_i : Pour obtenir un résultat exact, on doit prendre la limite , où les éléments de surface deviennent des éléments infinitésimaux . La somme devient alors une intégrale de surface : Flux électrique (3.4) L'intégrale de surface est probablement un nouveau type d'intégrale pour vous. L'intégrale se fait pas sur un intervalle comme dans le cas de l'intégrale définie, mais sur une surface. De plus, le facteur à intégrer comprend un produit scalaire entre deux vecteurs. Ces intégrales peuvent être complexes à calculer dans des situations générales. Cependant, les intégrales de surface que nous allons rencontrer sont très simples. 3.2 — Le flux électrique 89 Pour vérifier l'équation 3.4, prenons la situation d'un champ électrique uniforme. Dans ce cas, on peut calculer le produit scalaire et sortir le champ de l'intégrale : Il ne reste que l'intégrale de dA, ce qui représente la somme de tous les éléments de surface. Cette somme est simplement égale à l'aire de la surface complète : On obtient donc ce qui est bien l'équation 3.3, valable pour les champs électriques uniformes. Remarquez que l'intégrale de surface a été très simple à calculer. Les intégrales de surface que vous allez rencontrer ne seront pas plus difficiles. Le flux électrique pour une surface courbe La prochaine étape consiste à calculer le flux électrique à travers une surface courbe, comme celle d'une sphère ou celle d'un cylindre. Pour une surface courbe, le vecteur normal change d'un point à l'autre. On utilise alors la même méthode qu'à la soussection précédente. On divise la surface en éléments de surface , comme le montre la figure 3.14. Pour chaque élément, le flux est . Le flux total est obtenu en calculant la somme de tous les flux infinitésimaux (donc l'intégrale de surface) : (3.5) Ceci correspond à l'équation 3.4, qui est l'équation générale pour le calcul du flux à travers une surface quelconque. L'intégrale de l'équation 3.5 peut être très complexe à calculer pour une surface quelconque traversée par un champ électrique non uniforme. Il y a deux situations, illustrées à la figure 3.15 (voir la page suivante), où l'intégrale de surface se calcule très facilement : • lorsque le champ est normal à la surface (θ = 0°) et que son module E ne change pas pour tous les points de la surface (voir la figure 3.15a à la page suivante) ; dans ce cas, le flux est (3.6) • lorsque le champ électrique est tangent à la surface (θ = 90°) (voir la fi gure 3.15b à la page suivante) : (3.7) car cos(90°) = 0. FIGURE 3.14 Pour calculer le flux à travers une surface courbe, on divise la surface en éléments de surface . 90 CHAPITRE 03 — Le théorème de Gauss (a) (b) FIGURE 3.15 (a) Le flux pour un champ électrique normal ayant un module constant. (b) Le flux pour un champ tangent à la surface. Le flux électrique à travers une surface fermée Le théorème de Gauss met en relation la charge électrique et le flux électrique qui traverse une surface fermée, comme celle d'une sphère ou d'un cube.
Une surface fermée est une surface qui sépare deux régions de l'espace : l'intérieur et l'extérieur de la surface. Ceci permet de choisir sans ambiguïté le sens du vecteur unitaire et du vecteur , comme le montre la figure 3.16. FIGURE 3.16 Le vecteur fermée pour une surface Le vecteur est un vecteur unitaire, perpendiculaire à une surface et orienté vers l'extérieur de la surface fermée. Le vecteur est un vecteur infinitésimal orienté vers l'extérieur de la surface fermée. Avec cette convention, un flux positif indique des lignes de champ qui sortent de la surface, et un flux négatif indique des lignes de champ qui entrent dans la surface. Le calcul du flux se fait de la même façon, que la surface soit fermée ou non. Comme il est illustré à la figure 3.16, on sépare la surface en éléments de surface infinitésimaux , et on calcule le flux à travers chacun des éléments . Le flux net est l'intégrale de surface. La seule chose qui change est la notation : on ajoute un cercle dans le symbole d'intégrale pour indiquer que la surface est fermée. On a donc (3.8) Flux électrique (surface fermée) EXEMPLE 3.1 Le flux électrique à travers un cylindre Un champ électrique uniforme traverse un cylindre dont l'axe est parallèle à l'axe des y. Le cylindre a un rayon de 2,00 cm et une longueur de 10,0 cm. Calculez le flux électrique à travers le cylindre. SOLUTION Illustrer la situation La figure 3.17 montre le cylindre et le champ électrique. Nous divisons la surface du cylindre en trois parties : le cercle de gauche, la partie courbe du cylindre et le cercle de droite. FIGURE 3.17 Le schéma de la situation pour l'exemple 3.1 3.3 — Le théorème de Gauss 91 Décortiquer le problème (iii) Identifier la clé Finalement, pour la troisième intégrale, et ont la même orientation, et θ = 0°. Cette intégrale se calcule comme la première : La clé est l'équation 3.8 : (i) (iv) Résoudre le problème Pour la première surface, et sont opposés, alors θ = 180°. De plus, E est une constante. Nous obtenons En insérant les résultats des intégrales dans l'équation (i), nous obtenons (réponse) Valider la réponse La surface 1 est un cercle de rayon r.
L'intégrale restante donne simplement l'aire de ce cercle, soit $A_1 = \pi r^2$. La première intégrale est donc La réponse finale ne dépend pas du module du champ. Tout champ uniforme aurait produit un flux nul, car le cylindre est une surface fermée. En effet, toutes les lignes de champ qui entrent dans le cylindre par le côté gauche sortent par le côté droit, comme le montre la figure ci-dessous. (ii) Pour la deuxième intégrale, et sont perpendiculaires, car le champ est tangent à la surface courbe. Alors, 3.3 Le théorème de Gauss À première vue, le calcul du flux électrique peut vous sembler abstrait, mais il est nécessaire pour le théorème de Gauss, qui met en relation le flux électrique à travers une surface fermée et la charge à l'intérieur de cette surface. On obtient ce théorème à partir de la loi de Coulomb. Le théorème de Gauss a deux avantages par rapport à la loi de Coulomb : • pour certaines configurations possédant un haut degré de symétrie, il permet d'obtenir plus facilement le champ électrique. • il s'applique à des configurations de charges immobiles et à des charges en mouvement, alors que la loi de Coulomb n'est valable qu'en électrostatique.
92 CHAPITRE 03 — Le théorème de Gauss (a) (b) (c) FIGURE 3.18 Les lignes de champ permettent de connaître les charges qui sont dans la boîte. Pour continuer l'étude du champ électrique, nous allons utiliser la méthode des lignes de champ électrique présentée à la section 2.6. La figure 3.18 montre trois situations où on observe des lignes de champ autour d'une boîte fermée. Sans voir l'intérieur de la boîte, il est possible de deviner qu'il y a des charges électriques à l'intérieur dans les deux premières situations. En effet, les lignes de champ qui sortent de la boîte dans la première situation doivent provenir d'une charge positive. De même, dans la deuxième situation, les lignes de champ qui entrent dans la boîte doivent se rendre à une charge négative. Finalement, dans la troisième situation, on ne peut pas dire si la boîte contient ou non des charges.
Dans les situations précédentes, les lignes de champ qui entrent ou qui sortent de la boîte donnent une information partielle des charges à l'intérieur. Pour analyser des situations, on aura souvent recours à une surface fermée imaginaire, qu'on appelle une surface de Gauss. Pour simplifier les figures, on se limitera à faire une coupe transversale plutôt qu'un dessin à trois dimensions. Pour comprendre la relation entre le flux et la charge, prenons une charge ponctuelle positive q et calculons le flux à travers une surface de Gauss sphérique, de rayon r et centrée sur la charge. La figure 3.19 montre la charge et les lignes de champ. Les lignes de champ ont une symétrie sphérique, tout comme la surface de Gauss utilisée. Selon l'équation 2.3 de la page 33, le champ électrique est radial. Il est donc perpendiculaire à la surface de Gauss, et son module est . On obtient alors Le module du champ est le même pour tous les points de la sphère, car ils sont tous à la même distance r de la charge. On peut donc sortir le champ de l'intégrale : FIGURE 3.19 On calcule le flux électrique à travers la sphère de Gauss. L'intégrale de surface se résume à la surface complète de la sphère, c'est-à-dire que $A = 4\pi r^2$. Alors, (3.9) 3.3 — Le théorème de Gauss 93 REMARQUE Nous avons calculé le flux électrique pour une charge positive. Pour une charge négative, on obtient un flux négatif, ce qui indique que les lignes de champ entrent dans la surface plutôt que d'en sortir. L'équation 3.9 est très intéressante.
Le flux ne dépend pas du rayon de la sphère, mais uniquement de la valeur de la charge à l'intérieur de la sphère. Si on double le rayon de la sphère, l'aire de celle-ci va quadrupler, mais en même temps, le module du champ électrique à la surface de la sphère sera divisé par 4. Les deux effets s'annulent. Il s'agit d'une conséquence de la loi de Coulomb : la force électrique diminue selon $1/r^2$. On peut visualiser ce résultat à l'aide des lignes de champ de la figure 3.20 : les lignes de champ qui traversent la première sphère traversent aussi la deuxième.
Si on entoure la charge ponctuelle d'une surface de Gauss quelconque, il est plus difficile de calculer le flux, car la symétrie ne permet pas de calculer facilement l'intégrale de surface. En effet, le champ électrique n'est pas toujours normal, et son module change d'un point à l'autre de la surface. Par contre, comme le montre la figure 3.21, la surface quelconque est traversée par les mêmes lignes de champ que la surface sphérique. Ceci suggère que le flux ne dépend pas de la forme de la surface fermée. Dans les derniers exemples, la charge se trouve à l'intérieur de la surface. Si la charge se trouve à l'extérieur, comme à la figure 3.22a, les lignes de champ entrent et ressortent de la surface. Du côté où les lignes de champ entrent, le flux est négatif, alors qu'aux endroits où les lignes sortent, cela produit un flux positif. Au total, le flux net à travers une surface est nul lorsqu'aucune charge ne se trouve à l'intérieur de la surface. De même, s'il y a des charges à l'intérieur, mais que la charge nette est nulle (comme dans le cas d'un dipôle illustré à la figure 3.22b), il y aura alors autant de lignes sortantes que de lignes entrantes. Dans ce cas aussi, le flux net est nul. Pour terminer, on calcule le flux à travers une surface quelconque lorsqu'il y a N charges présentes, certaines à l'intérieur de la surface (q_1, q_2, . . ., q_j) et certaines (a) (b) FIGURE 3.22 Deux situations où le flux à travers une surface est nul : (a) la charge est à l'extérieur ; (b) la charge nette à l'intérieur est nulle. FIGURE 3.20 Les lignes de champ traversent les deux sphères. FIGURE 3.21 Les lignes de champ traversent les deux surfaces. Le flux ne change pas. 94 CHAPITRE 03 — Le théorème de Gauss à l'extérieur de la surface (q_{j+1}, . . ., q_N), comme le montre la figure 3.23. Le flux net correspond au flux du champ électrique résultant FIGURE 3.23 Seules les charges à l'intérieur contribuent au flux. Pour chaque charge à l'intérieur de la surface, le flux est $\Phi_i = q_i/\varepsilon_0$, alors que pour chaque charge à l'extérieur, le flux est $\Phi_i = 0$. On remarque que le flux net à travers une surface fermée ne vient que de la charge nette qui se trouve à l'intérieur de cette surface. Soit $Q_{int} = q_1 + q_2 + \cdots + q_j$ la charge nette à l'intérieur d'une surface fermée.
On obtient alors (3.10) Théorème de Gauss C'est le théorème de Gauss, une des nombreuses contributions à la physique et aux mathématiques de Carl Friedrich Gauss (1777-1855), mathématicien, astronome et physicien allemand, surnommé le prince des mathématiciens (voir la figure 3.24). On peut résumer le théorème de Gauss par : Le flux électrique à travers n'importe quelle surface fermée est proportionnel à la charge nette à l'intérieur de cette surface. MISE EN GARDE Le flux ne dépend que de la charge intérieure, mais le champ électrique dans l'équation 3.10 est le champ résultant, produit par les charges à l'intérieur et par les charges à l'extérieur de la surface. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 3.2 La figure suivante présente quatre charges ponctuelles entourées d'une surface de Gauss. Classez les configurations par ordre croissant du flux traversant la surface. FIGURE 3.24 Carl Friedrich Gauss (1777-1855), l'un des plus grands mathématiciens de l'histoire. Il a aussi fait des découvertes importantes en astronomie et en physique. (i) 3.4 (ii) (iii) (iv) Le théorème de Gauss en action Le théorème de Gauss est très utile pour calculer le champ électrique de systèmes chargés symétriques. Pour une distribution quelconque, on doit utiliser la méthode du chapitre 2, car il est très difficile d'isoler le champ électrique à partir du flux. Par contre, pour les configurations ayant une symétrie sphérique, 3.4 — Le théorème de Gauss en action cylindrique ou plane, il est possible de choisir une surface de Gauss pour que l'intégrale de surface soit très simple à calculer. Pour ce faire, il faut que la surface de Gauss ait la même symétrie que la configuration de charges. En complément, il est possible d'utiliser le principe de superposition si la configuration peut être divisée en plusieurs configurations ayant chacune une des symétries nécessaires. La stratégie suivante indique les étapes importantes pour calculer le module du champ électrique à partir du théorème de Gauss. STRATÉGIE 3.1 Le champ à l'aide du théorème de Gauss Illustrer la situation Dessinez la distribution de charge et tracez le champ électrique selon la symétrie de la distribution. Décortiquer le problème • Déterminez la symétrie.
Le théorème de Gauss peut être utilisé pour une symétrie sphérique, une symétrie cylindrique ou une symétrie plane. • Sur le schéma, tracez une surface de Gauss pour laquelle le flux électrique est simple à calculer. L'endroit où on veut obtenir le champ électrique doit être un point sur la surface de Gauss. • Tracez le vecteur , perpendiculaire à la surface de Gauss et orienté vers l'extérieur de la surface. Le vecteur devrait être soit parallèle, soit perpendiculaire au champ électrique. Identifier la clé La clé est le théorème de Gauss : Résoudre le problème • Calculez l'intégrale de surface correspondant au flux. L'intégrale peut être divisée en plusieurs intégrales. Par exemple, l'intégrale sur une surface de Gauss cylindrique est divisée en trois intégrales de surface, qui correspondent aux deux extrémités circulaires et à la partie courbe.
• Calculez la charge Q_{int}, à l'intérieur de la surface de Gauss. Seule la charge à l'intérieur produit un flux net à travers la surface de Gauss. • Insérez le flux et la charge Q_{int} dans le théorème de Gauss et isolez le module du champ électrique E. • Ajoutez un vecteur unitaire si c'est le champ électrique qui est recherché. Valider la réponse Vérifiez si la réponse a du sens, si l'orientation du champ respecte la symétrie de la distribution.
Les configurations sphériques La figure 3.25 illustre une sphère chargée. Cette configuration a une symétrie sphérique si la charge est uniformément distribuée ou si la charge volumique est 95 96 CHAPITRE 03 — Le théorème de Gauss une fonction de la distance par rapport au centre de la sphère. La sphère peut être une sphère pleine ou une sphère creuse. Comme on l'a vu à la section 3.1, le champ doit être radial. Pour obtenir le module du champ au point P, situé à une distance r du centre de la sphère, on calcule le flux à travers une surface de Gauss sphérique, de rayon r. Pour cette surface, le champ est parallèle à l'élément , et son module ne peut pas changer pour tous les points de la surface de Gauss, sinon le champ ne respecterait pas la symétrie sphérique de la distribution de charge. FIGURE 3.25 Pour une configuration sphérique, on utilise une surface de Gauss sphérique. EXEMPLE 3.2 Le champ d'une sphère chargée Une sphère de rayon R porte une charge Q uniformément distribuée.
Quel est le champ électrique à une distance r à l'extérieur de la sphère ?
SOLUTION Illustrer la situation Résoudre le problème Nous présentons à la figure 3.26 la sphère chargée entourée d'une sphère de Gauss de rayon r. Le point où nous voulons obtenir le champ est donc sur la surface de Gauss.
Nous calculons d'abord l'intégrale de surface. Comme le champ est radial, il est parallèle à l'élément De plus, le module du champ ne change pas sur la surface de Gauss. On peut le sortir de l'intégrale : (ii) où $A_{sphère} = 4\pi r^2$ est l'aire de la sphère de Gauss. On calcule ensuite la charge à l'intérieur de cette sphère de Gauss.
Ceci est simplement Q, la charge de la sphère chargée : FIGURE 3.26 La surface de Gauss pour l'exemple 3.2 Décortiquer le problème (iii) Nous choisissons une surface de Gauss sphérique de rayon r. Par symétrie, le champ doit être radial et son module ne doit pas changer le long de la surface de Gauss. Nous insérons les équations (ii) et (iii) dans l'équation (i) : Comme le champ est radial, nous obtenons Identifier la clé La clé est le théorème de Gauss, donné par l'équation 3.10 : (i) (réponse) Valider la réponse Nous répondons à la question en donnant un vecteur. Cette réponse est valable pour r > R, c'est-à-dire pour les points à l'extérieur de la sphère chargée. 3.4 — Le théorème de Gauss en action 97 L'exemple précédent est très intéressant : le champ électrique produit par une sphère uniformément chargée est le même que le champ produit par une charge ponctuelle Q qui serait placée au centre de celle-ci. On peut dire que pour les points à l'extérieur de la sphère, la sphère est équivalente à une charge ponctuelle. Il est possible de calculer le champ produit par une sphère à l'aide de l'équation 2.21 utilisant le calcul intégral. Cependant, cette dernière méthode demande un calcul algébrique plus long et une bonne expérience dans le calcul des intégrales. La méthode du théorème de Gauss est plus simple parce que la symétrie nous permet d'obtenir l'orientation du champ sans calcul.
EXEMPLE 3.3 À l'intérieur d'une sphère Une sphère isolante a une charge Q uniformément distribuée dans son volume et un rayon R. Calculez le champ pour un point à l'intérieur de la sphère et situé à une distance r du centre. SOLUTION Illustrer la situation Identifier la clé La clé est le théorème de Gauss : Nous avons encore besoin d'une surface de Gauss sphérique concentrique de rayon r, mais cette foisci, la surface de Gauss est plus petite que la sphère chargée (voir la figure 3.27). (ii) Résoudre le problème Le champ est parallèle à , et son module ne change pas le long de la surface de Gauss. Alors, (iii) FIGURE 3.27 La sphère de Gauss a un rayon r plus petit que le rayon R de la sphère chargée.
Il faut faire attention à Q_{int}, qui représente la charge à l'intérieur de la sphère de Gauss et non la charge totale. Nous calculons cette charge à partir de la charge volumique et du volume de la sphère de Gauss : Décortiquer le problème La distribution de charge a une symétrie sphérique.
Le champ doit être radial et son module doit dépendre de r, la distance par rapport au centre de la sphère. Nous avons choisi une surface de Gauss sphérique pour que le champ soit parallèle à sur toute la surface. (iv) où nous avons utilisé l'équation (i). Nous insérons les équations (iii) et (iv) dans l'équation (ii) : Comme la charge est uniformément distribuée, cela veut dire que la charge volumique ρ est uniforme : (i) Le champ électrique à l'intérieur est alors (réponse) 98 CHAPITRE 03 — Le théorème de Gauss Valider la réponse Nous répondons bien à la question. Le résultat montre que le champ est nul au centre de la sphère. De plus, le module du champ augmente de façon linéaire avec la distance, jusqu'à la surface de la sphère. Pour un point à la surface r = R, le résultat du présent exemple donne la même expression que l'exemple précédent, c'est-à-dire $E = Q/(4\pi\varepsilon_0 R^2)$. Les résultats des deux derniers exemples sont résumés dans le graphique de la figure 3.28. FIGURE 3.28 Le module du champ produit par une sphère chargée en fonction de la distance par rapport au centre de la sphère Les configurations cylindriques Pour avoir une configuration à symétrie cylindrique, on a besoin d'un cylindre infini, dont la charge volumique est uniforme, ou d'une fonction de la distance r à l'axe. Le cylindre peut être plein ou creux, avec la charge répartie dans tout son volume ou simplement sur sa surface. Comme nous avons vu à la section 3.1, le champ électrique doit être radial, c'est-à-dire perpendiculaire à l'axe du cylindre, et son module doit être le même pour tous les points situés à la même distance r de l'axe. Pour calculer le module du champ au point P à une distance r de l'axe, on choisit une surface de Gauss cylindrique, de rayon r et de longueur , comme il est illustré à la figure 3.29. L'axe du cylindre de Gauss doit coïncider avec l'axe du cylindre chargé pour que l'intégrale de surface soit très simple à calculer. FIGURE 3.29 La surface de Gauss pour les configurations cylindriques EXEMPLE 3.4 Le champ produit par un cylindre Un très long cylindre a un rayon de 10,0 cm, et il porte une charge distribuée uniformément sur sa surface. La charge surfacique est $\sigma = -4{,}50 \times 10^{-6}$ C/m2. a. Quel est le champ électrique à une distance de 7,00 cm de l'axe du cylindre ? b. Quel est le champ électrique à une distance de 12,0 cm de l'axe du cylindre ? SOLUTION a. Illustrer la situation Le point P est à l'intérieur du cylindre. Nous allons donc calculer le flux à travers un cylindre de rayon r = 7,00 cm et de longueur . La figure 3.30 montre le cylindre et la surface de Gauss, selon une représentation en trois dimensions et selon une coupe transversale. 3.4 — Le théorème de Gauss en action 99 (ii) Selon la coupe transversale de la figure 3.30a, il n'y a pas de charge à l'intérieur du cylindre de Gauss, car la charge est limitée à la surface du cylindre chargé. Alors, (iii) Nous obtenons donc FIGURE 3.30 (réponse) (a) La surface de Gauss pour l'exemple 3.4a. (b) coupe transversale. Valider la réponse Le champ est nul même si le point P n'est pas exactement au centre du cylindre. C'est la conséquence de la symétrie cylindrique et du flux nul. Décortiquer le problème SOLUTION b. Illustrer la situation Le champ doit être radial, et son module ne doit pas changer le long de la surface courbe du cylindre de Gauss. Pour trouver le champ à une distance r = 12,0 cm, il faut une surface de Gauss cylindrique de rayon r = 12,0 cm, comme le montre la figure 3.31. Identifier la clé La clé est le théorème de Gauss : (i) Résoudre le problème L'intégrale de surface fermée peut être divisée en trois intégrales de surface : pour le cercle de gauche, la partie courbe (le côté du cylindre) et le cercle de droite : FIGURE 3.31 La surface de Gauss pour l'exemple 3.4b. (b) La coupe transversale. Comme le montre la figure 3.30, et sont perpendiculaires. et le sont également. Alors, Décortiquer le problème De plus, et ont la même orientation, et le module de doit être constant le long de la surface de Gauss selon la symétrie cylindrique. Alors, Identifier la clé Le champ doit être radial, et son module ne doit pas changer le long de la surface courbe du cylindre de Gauss. La clé est le théorème de Gauss : (iii) 100 CHAPITRE 03 — Le théorème de Gauss Résoudre le problème L'intégrale de surface se calcule de la même façon que dans la partie a. : Ici, nous utilisons le rayon R du cylindre chargé, car la charge est à la surface de ce cylindre, comme le montre la vue en coupe de la figure 3.31b. En insérant les résultats dans l'équation (iv), nous obtenons Il ne reste qu'à insérer les valeurs : (réponse) Valider la réponse (v) Remarquez que l'intégrale de surface dépend du rayon de la surface de Gauss. Pour Q_{int}, nous utilisons la charge surfacique du cylindre et son rayon, en plus de la longueur de la surface de Gauss, car la partie du cylindre chargé, comprise dans la surface de Gauss a une longueur : (vi) (a) Le résultat a du sens. Le signe négatif indique que le champ est orienté vers le cylindre.
Remarquez que dans les schémas et les équations, nous avons tenu pour acquis que le champ était orienté vers l'extérieur. Il est important d'ajouter le signe négatif seulement à la fin du calcul pour éviter d'insérer ce signe deux fois. De plus, il est préférable de résoudre le problème de façon algébrique, avec des paramètres qui peuvent être positifs ou négatifs, et d'insérer les valeurs à la fin du problème. Dans le dernier exemple, seules les charges à l'intérieur de la surface contribuent au flux électrique. Pour cette raison, Q_{int} est proportionnelle à la longueur du cylindre de Gauss. Cependant, toutes les charges du cylindre contribuent au champ électrique. Les charges à l'extérieur de la surface de Gauss sont essentielles pour que le champ soit radial. Si le cylindre avait une longueur , on ne pourrait pas utiliser le théorème de Gauss pour obtenir le champ électrique, car la configuration n'aurait pas la symétrie cylindrique. Les configurations à symétrie plane (b) FIGURE 3.32 La surface de Gauss pour un plan infini : (a) vue en perspective ; (b) vue en coupe transversale. Un plan chargé a une symétrie plane s'il est infini et si sa charge surfacique est uniforme.
Il doit aussi avoir une épaisseur négligeable. Dans ce cas, la symétrie plane impose un champ électrique normal au plan, et son module doit être le même pour les points situés à la même distance du plan. Pour calculer le module du champ au point P, on utilise comme surface de Gauss un cylindre centré par rapport au plan et dont l'axe est perpendiculaire au plan. Le cylindre de Gauss s'étend de chaque côté du plan, et le point P se trouve sur une des surfaces circulaires. La figure 3.32 illustre cette surface de Gauss. 3.4 — Le théorème de Gauss en action EXEMPLE 3.5 101 Une charge au-dessus d'un plan Un plan infini, parallèle au plan des xy, a une charge surfacique $\sigma = 2{,}80 \times 10^{-4}$ C/m2. Une charge ponctuelle q = 8,90 μC est placée à une distance de 4,50 cm au-dessus du plan. Calculez la force électrique exercée sur la charge par le plan.
SOLUTION Illustrer la situation Identifier les clés Pour calculer le champ électrique à la position de la charge ponctuelle, nous traçons une surface de Gauss cylindrique qui s'étend de chaque côté du plan et qui est centrée par rapport au plan (voir la figure 3.33). L'aire transversale du cylindre est égale à A.
La première clé est l'équation 2.2 de la page 31 pour trouver la force électrique sur une charge ponctuelle : (i) La deuxième clé est le théorème de Gauss pour calculer le champ électrique : (ii) Résoudre le problème La surface de Gauss peut être divisée en trois surfaces : les deux bouts et le côté du cylindre : (a) Pour la première surface, et ont la même orientation, et le module de E ne change pas sur la surface. Alors, (b) FIGURE 3.33 La surface de Gauss pour l'exemple 3.5 : (a) vue en perspective ; (b) vue en coupe transversale. On obtient exactement le même résultat pour le deuxième bout : Décortiquer le problème Pour le côté du cylindre, et La configuration a une symétrie plane.
Le champ doit être normal au plan et avoir le même module à une distance d de chaque côté du plan. sont perpendiculaires : 102 CHAPITRE 03 — Le théorème de Gauss La charge Q_{int} se calcule en multipliant la charge surfacique et l'aire du plan qui intersecte la surface de Gauss.
Cette aire est égale à A. Alors, (iii) Pour un point au-dessus du plan, le vecteur normal correspond au vecteur . Il reste à insérer le résultat de l'équation (iii) dans l'équation (i) : (réponse) Valider la réponse Remarquez que l'équation (iii) est équivalente à l'équation 2.28, que nous avons obtenue au chapitre 2 en utilisant le calcul d'intégrale. La méthode du théorème de Gauss est beaucoup plus simple. Pour terminer, on peut dire que le théorème de Gauss est toujours valable, mais qu'il est utile pour calculer le champ électrique dans un nombre limité de configurations.
Pour les configurations à symétrie sphérique, cylindrique ou plane, le champ électrique est obtenu rapidement avec le théorème de Gauss. Pour les autres configurations, on doit utiliser la méthode expliquée au chapitre 2, car c'est une méthode générale. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 3.3 À l'aide du théorème de Gauss, on veut calculer le champ électrique à l'extérieur d'un cube dont la charge volumique est uniforme. Quelle forme de la surface de Gauss doit-on utiliser ? 3.5 FIGURE 3.34 Dans un conducteur en équilibre électrostatique, Condition d'équilibre électrostatique pour un conducteur Les conducteurs en équilibre électrostatique La figure 3.34 montre un conducteur neutre dans un champ électrique extérieur . Comme on l'a vu à la section 1.3, un conducteur possède des électrons qui sont libres de se déplacer à l'intérieur de celui-ci. Ces électrons vont subir une force électrique opposée au champ électrique (leur charge est négative) et ils vont s'accumuler sur la surface du conducteur. Ceci laisse des ions positifs à l'autre extrémité du conducteur. Cette séparation de charge produit un champ supplémentaire , le champ induit, qui est opposé au champ extérieur. Le mouvement des électrons va se poursuivre jusqu'à ce que annule complètement à l'intérieur du conducteur ( ). Le conducteur est alors en équilibre électrostatique. On obtient : Le champ électrique à l'intérieur d'un conducteur en équilibre électrostatique est nul. Cet énoncé est aussi valable si le conducteur est chargé, et la forme du conducteur n'a pas d'incidence sur cet énoncé. De plus, le mouvement des électrons est très rapide, ce qui fait en sorte que l'équilibre est atteint après une fraction de seconde. 3.5 — Les conducteurs en équilibre électrostatique 103 La charge et le champ près de la surface Le théorème de Gauss nous permet de connaître la façon dont se distribuent les charges du conducteur. Pour ce faire, on choisit une surface de Gauss qui est tout juste à l'intérieur du conducteur (voir la figure 3.35). Comme on vient de le voir, le champ électrique est nul dans tout le conducteur. Donc, le flux à travers la surface est nul. Selon le théorème de Gauss, Il n'y a pas de charge à l'intérieur du conducteur. Toute la charge du conducteur doit se répartir sur la surface extérieure. Le champ électrique est nul à l'intérieur du conducteur, mais pas à l'extérieur. Pour que les charges à la surface soient à l'équilibre, il faut que la composante du champ tangentielle à la surface soit nulle. Si ce n'est pas le cas, une force tangentielle s'exerce sur les électrons, et ces derniers vont se déplacer jusqu'à ce que cette composante soit nulle. De cette façon, le champ tout juste à l'extérieur du conducteur est normal à la surface, c'est-à-dire perpendiculaire, comme le montre la figure 3.36. Pour trouver le module du champ tout juste à l'extérieur, on utilise une surface de Gauss cylindrique, dont l'extrémité transversale traverse à peine le conducteur, et l'aire transversale A est très petite (voir la figure 3.37). Le flux à travers cette surface est simplement EA, car le champ traverse uniquement la petite surface transversale. En effet, le champ est nul à l'intérieur du conducteur (ce qui donne un flux nul pour la partie de la surface de Gauss à l'intérieur du conducteur), et il est perpendiculaire à l'élément de surface de la surface courbe du cylindre.
Soit σ la charge surfacique du conducteur à l'endroit où le cylindre traverse le conducteur.
Alors, selon le théorème de Gauss, Donc, le champ électrique tout juste à l'extérieur du conducteur est (tout juste à l'extérieur) , (3.11) où est le vecteur unitaire normal à la surface, orienté vers l'extérieur de celle-ci. De façon générale, la charge surfacique n'est pas uniforme sur toute la surface du conducteur. Il faut prendre la valeur de σ vis-à-vis de l'endroit où on veut déterminer le champ électrique. FIGURE 3.36 FIGURE 3.37 Le champ électrique à la surface d'un conducteur La surface de Gauss cylindrique perpendiculaire à la surface du conducteur FIGURE 3.35 Une surface de Gauss est placée tout juste à l'intérieur du conducteur chargé. 104 CHAPITRE 03 — Le théorème de Gauss Une cavité à l'intérieur d'un conducteur Supposons maintenant qu'un conducteur chargé possède une cavité vide. Le champ doit être nul dans le conducteur, mais est-il nul aussi dans la cavité ? Pour répondre à cette question, on entoure la cavité d'une surface de Gauss, comme le montre la figure 3.38. Celle-ci est tout juste dans le conducteur, ce qui implique que le champ est nul sur toute la surface. Selon le théorème de Gauss, FIGURE 3.38 Un conducteur avec une cavité Il n'y a donc pas de charge à l'intérieur de la surface de Gauss. Comme la cavité est vide, cela indique qu'il n'y a pas de charge sur la paroi de la cavité. Toute la charge excédentaire du conducteur se trouve sur sa surface extérieure. Comme le champ à l'intérieur du conducteur est nul, et il n'y a pas de charge sur la surface de la cavité, cela implique que le champ à l'intérieur de la cavité doit être nul, quel que soit le champ extérieur. Il s'agit d'un résultat important qui permet d'isoler un objet d'un champ électrique extérieur en plaçant l'objet à l'intérieur d'un conducteur. La figure 3.39 montre les lignes de champ autour d'un conducteur ayant une cavité. FIGURE 3.39 Une cage de Faraday simple Une cage de Faraday est constituée de murs en grillage métallique. Les électrons du grillage se déplacent en fonction du champ électrique extérieur de telle sorte que le champ est nul à l'intérieur de la cage. La photo de l'ouverture du chapitre est une illustration spectaculaire de ce dispositif. Les cages de Faraday sont utilisées pour protéger les instruments sensibles aux champs électriques. Si une charge q se trouve dans la cavité du conducteur, il y aura alors un champ électrique à l'intérieur de celle-ci.
En reprenant la surface de Gauss qui entoure la cavité, comme le montre la figure 3.40, on trouve de nouveau que $Q_{int} = 0$, car le champ doit rester nul à l'intérieur du conducteur. Ceci implique qu'une charge −q va se répartir sur la paroi intérieure du conducteur. Par exemple, si une charge +q positive est à l'intérieur de la cavité, elle va attirer des électrons du conducteur sur la paroi de la cavité. La charge −q qui s'accumule sur la paroi de la cavité fait partie de la charge du conducteur. Pour un conducteur neutre, les électrons qui se déplacent vont laisser des ions positifs sur la surface extérieure. Si le conducteur a une charge nette Q_{cond} non nulle, cette charge sera égale à la somme des charges sur chacune des parois. Comme le conducteur n'est pas en contact avec d'autres objets, sa charge doit être conservée. FIGURE 3.40 Une charge dans une cavité d'un conducteur En résumé, on peut trouver les propriétés d'un conducteur en équilibre électrostatique à l'aide de la technique suivante : 3.5 — Les conducteurs en équilibre électrostatique TECHNIQUE 3.1 105 Un conducteur en équilibre électrostatique 1. À l'intérieur du conducteur, le champ électrique est nul. 2. La charge excédentaire se trouve uniquement sur la surface extérieure du conducteur. 3. Le champ tout juste à l'extérieur du conducteur est où σ est la charge surfacique à cet endroit.
4.
Si un conducteur possède une cavité, celle-ci est isolée des champs électriques extérieurs.
5. Si une cavité d'un conducteur contient une charge q, il y a une charge induite opposée (−q) sur la paroi de la cavité. EXEMPLE 3.6 La charge d'une sphère conductrice creuse Une sphère conductrice creuse a un rayon intérieur R_1 = 2,00 cm et un rayon extérieur R_2 = 5,00 cm. La sphère a une charge Q = 2,50 μC. Au centre de la cavité, il y a une charge ponctuelle q = 4,50 μC. a. Calculez la charge surfacique sur la surface intérieure de la sphère creuse. b. Quel est le champ électrique à une distance r = 3,00 cm de la charge ponctuelle ? c.
Calculez la charge surfacique sur la surface extérieure de la sphère creuse. SOLUTION Illustrer la situation Le schéma de la situation est présenté à la figure 3.41. SOLUTION a. Identifier la clé La première clé est la note 5 de la technique 3.1 : pour une charge q dans une cavité, il y a une charge induite −q opposée sur la paroi de la cavité : FIGURE 3.41 Le schéma de la situation pour l'exemple 3.6 La deuxième clé est la définition de la charge surfacique, donnée à l'équation 2.11 : (i) Décortiquer le problème La sphère creuse est conductrice.
Il y a une charge induite négative sur la paroi intérieure.
Résoudre le problème Nous obtenons (réponse) 106 CHAPITRE 03 — Le théorème de Gauss SOLUTION b. Identifier la clé La clé est la note 1 de la technique 3.1 : le champ est nul à l'intérieur d'un conducteur : La charge surfacique sur la surface extérieure est (réponse) SOLUTION c. Identifier la clé La première clé est la conservation de la charge pour la sphère conductrice : (ii) La deuxième clé est l'équation (i). Résoudre le problème La charge sur la surface extérieure est (réponse) Valider la réponse La charge induite sur la paroi intérieure est opposée à la charge ponctuelle. La charge sur la surface extérieure est plus grande que la charge nette de la sphère creuse, car il y a une charge induite négative sur la paroi intérieure. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 3.4 Une sphère creuse conductrice porte une charge positive +Q. On place une charge ponctuelle négative q à l'intérieur de la cavité de la sphère creuse. Parmi les énoncés suivants, lequel est vrai ? (i) La force exercée sur q est attractive. (ii) La force exercée sur q est répulsive. (iii) La force exercée sur q est nulle. (iv) On doit connaître comment la charge +Q est distribuée pour connaître la force exercée sur q. Les plaques parallèles conductrices À première vue, il semble y avoir une différence entre deux des résultats obtenus précédemment. D'abord, nous avons trouvé à la section 2.5 et à l'exemple 3.5 que, dans le cas d'un plan infini, le module du champ électrique produit par une plaque infinie est $E = \sigma/(2\varepsilon_0)$. Ensuite, nous avons trouvé que le champ tout juste à l'extérieur d'un conducteur a un module $E = \sigma/\varepsilon_0$. Donc, si la plaque infinie est conductrice, quelle est la bonne équation pour le module du champ ? Est-ce que l'équation $E = \sigma/(2\varepsilon_0)$ s'applique uniquement aux isolants et l'équation $E = \sigma/\varepsilon_0$ aux conducteurs ? Pour répondre à ces questions, prenons une très grande plaque conductrice, ayant une aire A. On place une charge Q sur la plaque, comme le montre la figure 3.42a. Cette charge doit se répartir sur la surface extérieure du conducteur, de telle sorte que à l'intérieur. Ceci implique que la charge va se répartir sur les deux faces de la plaque, ce qui est équivalent à deux plans de charges. Il y a alors une charge Q/2 sur la face gauche et une charge Q/2 sur la face droite.
Les charges surfaciques sont (3.12) 3.6 — Le champ électrique dans les diélectriques 107 Pour obtenir le champ, on doit utiliser le principe de superposition : chaque plan de charge produit un champ électrique . On a alors, selon la figure 3.42b : (a) Dans ce cas, on obtient le résultat attendu pour les conducteurs : un champ nul à l'intérieur, et un champ dont le module est $E = \sigma/\varepsilon_0$ tout juste à l'extérieur. Si à la place, la plaque est isolante, alors la charge est distribuée sur une seule face. Alors, (b) FIGURE 3.42 et le champ électrique est ce qui est le même résultat que pour la plaque conductrice. On peut donc dire qu'il n'y a pas d'incohérence entre le résultat d'une plaque infinie, obtenu à l'aide du théorème de Gauss, et le résultat obtenu pour les conducteurs. (a) Très grande plaque conductrice, dont la charge nette est Q.
(b) La plaque est remplacée par deux plans ayant des charges surfaciques σ_g et σ_d. Finalement, si l'on place deux très grandes plaques conductrices parallèlement, l'une avec une charge +Q et l'autre avec une charge −Q, alors les charges excédentaires vont se répartir seulement sur les faces intérieures de chaque plaque, comme le montre la figure 3.43, car les charges d'une plaque attirent les charges de l'autre plaque. Cette fois-ci, la charge +Q de la plaque de gauche est répartie sur une surface A, et la charge surfacique est $\sigma_+ = Q/A$ (le double de la plaque de la figure 3.42). De même, la plaque négative aura une charge surfacique $\sigma_- = -Q/A$. Cette configuration est identique à celle étudiée à la section 2.5 de la page 53. On obtient alors : FIGURE 3.43 (3.13) avec $\sigma = \sigma_+ = Q/A$. 3.6 Le champ électrique dans les diélectriques Au chapitre 1, nous avons vu qu'un isolant est polarisé lorsqu'il est en présence d'un autre objet chargé. Il y a deux possibilités : dans le cas d'atomes ou de molécules n'ayant pas de moment dipolaire, le champ électrique extérieur sépare légèrement le nuage électronique par rapport au noyau positif, et l'atome devient un dipole induit avec un moment dipolaire parallèle au champ électrique extérieur . Si l'atome possède un moment dipolaire (comme c'est le cas pour les molécules d'eau), le champ va faire tourner les molécules pour Deux plaques conductrices de charges opposées 108 CHAPITRE 03 — Le théorème de Gauss que le moment dipolaire soit parallèle au champ extérieur, comme nous l'avons décrit à la section 2.8. Donc, dans les deux cas, les molécules de l'isolant ont un moment dipolaire parallèle au champ extérieur (voir la section 2.8 à la page 67). L'isolant est alors appelé un diélectrique. La polarisation produit un champ induit à l'intérieur du diélectrique, ce qui modifie le champ électrique résultant à l'intérieur du diélectrique.
FIGURE 3.44 Un diélectrique dans un champ extérieur est polarisé. Pour comprendre l'effet de la polarisation sur le champ électrique, on place un diélectrique entre deux grandes plaques parallèles, l'une chargée positivement et l'autre chargée négativement (voir la figure 3.44). Les plaques produisent un champ orienté de la plaque positive vers la plaque négative. Ce champ polarise le diélectrique en orientant les dipôles moléculaires comme le montre la figure 3.44. Les moments dipolaires sont dans le même sens que le champ . L'alignement des dipôles produit un surplus de charges négatives près de la face gauche du diélectrique et un surplus de charges positives près de sa face droite. On appelle ces charges des charges liées, car elles ne peuvent pas quitter leurs molécules. Elles produisent néanmoins un champ électrique supplémentaire à l'intérieur du diélectrique. Comme le montre la figure 3.45, ce champ est opposé au champ électrique . Avec l'axe des x orienté vers la droite, on obtient comme champ résultant à l'intérieur du diélectrique : FIGURE 3.45 Le diélectrique polarisé est équivalent à des charges liées, qui produisent un champ . Les charges liées font que le champ à l'intérieur du diélectrique est plus faible que , sans que soit nul comme dans le cas du champ électrique à l'intérieur d'un conducteur. TABLEAU 3.1 Pour la plupart des diélectriques, le champ résultant est proportionnel au champ extérieur : La valeur approximative de la constante diélectrique à 20 °C Substance Air k 1,000 59 Eau 80,4 Germanium 16 Glycérine 42,5 Méthanol 33,6 Mica 3à6 Papier 3 Plexiglas 3,4 Polyéthylène 2,25 Polystyrène 2,6 Porcelaine 6à8 PVC 3,4 Teflon 2,1 Verre 4à7 (3.14) La constante sans unité k (la lettre grecque kappa minuscule) est la constante diélectrique du matériau. C'est une propriété du diélectrique. Comme est plus faible que , la constante diélectrique est plus grande que 1, sauf pour le vide dont la constante diélectrique est exactement égale à 1. Les substances comme les gaz ont une constante diélectrique très près de 1, car leur polarisation est très faible dans un champ électrique. À l'opposé, la constante diélectrique de l'eau est très élevée, car c'est une molécule qui a un moment dipolaire permanent qui peut facilement être aligné avec le champ extérieur. Le tableau 3.1 donne la valeur de k pour quelques substances. Ce tableau est aussi présenté à l'annexe C.
Nous reparlerons des diélectriques au chapitre 5 lorsque ces derniers seront utilisés dans la fabrication des condensateurs. La figure 3.46 montre une surface de Gauss qui est en partie dans le diélectrique. Le théorème de Gauss met en relation le flux électrique et la charge nette à l'intérieur de la surface de Gauss, donc la charge liée et la charge sur le conducteur, qu'on appelle la charge libre, car celle-ci est libre de se déplacer d'une molécule à l'autre. On a alors (3.15) 3.6 — Le champ électrique dans les diélectriques 109 Cette équation est difficile à utiliser au niveau macroscopique, car seule la charge libre se mesure facilement à notre échelle. Pour cette raison, on réécrit habituellement cette équation uniquement en fonction de la charge libre. Pour ce faire, considérons le champ produit uniquement par les charges libres, c'està-dire . Alors, FIGURE 3.46 Une surface de Gauss pour analyser le champ dans le diélectrique Pour les diélectriques qui suivent l'équation 3.14, on obtient (3.16) On définit la permittivité du diélectrique par = k 0. C'est pour cette raison que 0 est souvent appelée la permittivité du vide, car k = 1 pour le vide.
L'équation 3.16 est appelée le théorème de Gauss dans la matière. Nous avons obtenu cette équation pour une situation simple, mais c'est une équation générale, valide aussi lorsque le diélectrique a des charges libres. Il est donc possible d'inclure l'effet de la polarisation du diélectrique dans le théorème de Gauss en ne tenant compte que de la charge libre, la charge qu'on place directement sur un objet. Lorsque la configuration possède l'une des symétries (plane, cylindrique ou sphérique), on applique la méthode de la section 3.4 en remplaçant 0 par = k 0 et en tenant compte seulement de la charge libre à l'intérieur de la surface de Gauss. REMARQUE L'équation 3.15 est parfois appelée le théorème de Gauss dans le vide, ce qui laisse entendre que cette équation est moins générale que l'équation 3.16 qui s'applique à tous les matériaux, y compris le vide. En fait, les deux équations sont tout à fait équivalentes : la première est plus utile au niveau microscopique, car elle fait intervenir toutes les charges présentes, alors que la seconde équation est plus utile au niveau macroscopique, car elle est écrite en fonction de la charge qu'on mesure facilement au niveau macroscopique, la charge libre. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 3.5 On insère un diélectrique entre deux plaques parallèles chargées, comme il est indiqué à la figure ci-dessous.
Les plaques exercent une force sur le diélectrique durant l'insertion. Cette force est-elle attractive ou répulsive ? Expliquez votre réponse. 110 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES RÉSUMÉ RÉSUMÉ Dans ce chapitre, nous avons vu qu'il est possible de calculer le champ électrique à l'aide du théorème de Gauss et de la symétrie.
LES DÉFINITIONS LES LOIS ET LES PRINCIPES Le flux électrique à travers une surface est proportionnel au nombre de lignes de champ qui traversent la surface. (champ uniforme) • Selon le théorème de Gauss, le flux à travers une surface fermée est proportionnel à la charge Q int à l'intérieur de la surface. La forme de la surface n'influence pas le flux. (équation générale) • Le champ électrique doit avoir la même symétrie que la configuration de charges. (uniforme) (cas général) LES RÉSULTATS Le théorème de Gauss et la symétrie sont utiles pour calculer le champ électrique dans les cas suivants. La symétrie sphérique La symétrie cylindrique La symétrie plane LES APPLICATIONS Pour un conducteur en équilibre électrostatique: Dans un diélectrique : • un champ extérieur polarise le diélectrique ; • la polarisation produit un champ induit supplémentaire à l'intérieur ; • à l'intérieur du conducteur, le champ électrique est nul ; • le champ à l'intérieur est plus faible : • la charge excédentaire se trouve uniquement sur la surface extérieure du conducteur ; • le champ tout juste à l'extérieur du conducteur est où k est la constante diélectrique du matériau ; • le théorème de Gauss peut s'écrire en fonction de la charge libre : où σ est la charge surfacique à cet endroit ; • si un conducteur possède une cavité, celle-ci est isolée des champs électriques extérieurs ; • si une cavité d'un conducteur contient une charge q, il y a une charge induite −q opposée sur la paroi de la cavité. QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 111 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Q questions qualitatives • E exercices simples • P problèmes • solution disponible Section 3.1 La symétrie Q3 La figure 3.49 illustre deux plans infinis, ainsi qu'un Q1 La figure 3.47 illustre trois configurations cylindriques cube, avec le champ électrique. Indiquez les configurations qui ne changent pas : (vues de face et en coupe transversale) et le champ électrique. Indiquez les configurations qui ne changent pas : a. lorsque s'effectue une translation ; a. lorsque s'effectue une translation le long de l'axe ; b. lorsque s'effectue une réflexion par rapport au plan. b. lorsque s'effectue une rotation autour de l'axe ; c. Quelle configuration a une symétrie plane ? c. lorsque s'effectue une réflexion par rapport à l'axe ; d.
lorsque s'effectue une réflexion par rapport à un plan perpendiculaire à l'axe. e.
Quelle configuration a une symétrie cylindrique. (i) (ii) (iii) FIGURE 3.49 • Question 3 Section 3.2 Le flux électrique Q4 Un champ électrique uniforme est perpendiculaire à une surface carrée de côté R. Qu'arrive-t-il au flux électrique : a. si le champ électrique double ? b. si la surface diminue de moitié ?
FIGURE 3.47 • Question 1 Q2 La figure 3.48 illustre deux configurations sphériques c. si la surface est circulaire de rayon R au lieu d'être carrée ? selon une coupe transversale, et le champ électrique. Indiquez les configurations qui ne changent pas : d. si l'angle entre le champ et la surface est de 45° ? a. lorsque s'effectue une rotation autour du centre de la sphère ; un cylindre, de 5,00 cm de rayon et de 10,0 cm de longueur, dans le sens de sa longueur. Quel est le flux électrique à travers le cylindre ? b. lorsque s'effectue une réflexion par rapport à un diamètre à 45° par rapport à l'horizontale. c. Quelle configuration a une symétrie sphérique ? (i) FIGURE 3.48 • Question 2 E5 Un champ électrique uniforme de 5,50 kN/C traverse E6 Un champ électrique a un module de 350 N/C et forme un angle de 40,0° avec la partie positive de l'axe des x. Il traverse un anneau de 60,0 cm de rayon placé perpendiculairement à l'axe des x (voir la figure 3.50). Calculez le flux électrique à travers la surface délimitée par l'anneau. (ii) FIGURE 3.50 • Exercice 6 112 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES est uniforme. Une plaque circulaire de 25,0 cm de rayon est située dans ce champ, et son plan forme un angle de 60,0 ° par rapport à l'axe des x. E13 Un champ uniforme a. Calculez le flux électrique traversant la plaque. b. Quel est le flux à travers la partie supérieure de l'hémisphère ? E7 Un champ électrique b. Par quel facteur le flux est-il multiplié si l'angle diminue pour former un angle de 30,0° ?
traverse une hémisphère de rayon R de façon parallèle à l'axe de la demi-sphère, comme il est illustré à la figure 3.53. a.
Quel est le flux à travers la base de l'hémisphère ? c. Par quel facteur le flux est-il multiplié si on remplace la plaque circulaire par une plaque rectangulaire, de 50,0 cm sur 60,0 cm, dont le plan forme un angle de 60,0° par rapport à l'axe des x ? E8 Une plaque carrée de 30 cm de côté est située dans le plan des xz. Un champ électrique uniforme traverse la plaque. Calculez le flux électrique à travers la plaque. P9 Un champ uniforme traverse un cube dont les côtés mesurent 12,0 cm (voir la figure 3.51). a. Calculez le flux à travers chacune des surfaces. b. Quel est le flux net à travers le cube ? FIGURE 3.53 • Exercice 13 E14 Une charge ponctuelle q = −25,0 nC est placée au centre d'un cube dont les côtés mesurent 30 cm. a. Quel est le flux net à travers le cube ? b. Quel est le flux à travers la face supérieure du cube ? E15 La figure 3.54 montre un cylindre de Gauss et le champ électrique. Pour chacune des surfaces, le champ est uniforme et perpendiculaire. La figure donne aussi le module et l'orientation du champ électrique vis-à-vis de chaque surface du cylindre. Le cylindre a une longueur de 66,0 cm et un rayon de 15,0 cm. a.
Quel est le flux net à travers la surface ? FIGURE 3.51 • Problème 9 b. Quelle est la charge nette dans le cylindre ? Section 3.3 Le théorème de Gauss Q10 Une charge +q est placée au centre d'une sphère de rayon R. Que devient le flux dans les situations suivantes ? a. Le rayon de la sphère est triplé. b. La charge est divisée par 2.
c. La charge est retirée de la sphère. d. La sphère est remplacée par un cube de côtés R. E11 Deux charges ponctuelles q_1 = 4,20 μC et q_2 = −2,50 μC se situent à l'intérieur d'un cube de 12 cm de côté (voir la figure 3.52). Une troisième charge q_3 = −3,00 μC est à l'extérieur du cube. Quel est le flux net à travers le cube ? FIGURE 3.54 • Exercice 15 E16 Une surface de Gauss possède une forme cubique dont chaque arête a une longueur L. Trois charges ponctuelles, +Q, −3Q et −Q/2, se situent à l'intérieur de la surface de Gauss. Une charge de +2Q et une charge de +Q/2 se trouvent à l'extérieur de la surface de Gauss. a. Quel est le flux net traversant la surface de Gauss ? b. Une deuxième surface englobe toutes les charges. Quel est le flux net traversant cette surface ? E17 Trois charges ponctuelles q_1 = 4,00 μC, q_2 = 1,00 μC et FIGURE 3.52 • Exercice 11 E12 Deux charges ponctuelles q_1 = 4,00 μC et q_2 = −7,00 μC sont situées à l'intérieur d'une surface de Gauss sphé rique de rayon R. Calculez le flux net à travers la surface de Gauss. q_3 = −3,00 μC sont situées aux sommets d'un triangle équilatéral de 4,00 cm de côté, comme le montre la figure 3.55. Une sphère est centrée sur le point P. a. Quel est le plus grand rayon de la sphère pour que le flux à travers celle-ci soit nul ? b. Calculez le flux électrique à travers une sphère de 3,00 cm de rayon, dont le centre se trouve au point P. QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 113 (i) le cylindre seulement ; (ii) la sphère seulement ; (iii) le cube seulement ; (iv) le cylindre et la sphère ; (v) les trois surfaces. FIGURE 3.55 • Exercice 17 Q21 Une tige isolante uniformément chargée, d'une lon- P18 Un cube de 10,0 cm de côté est placé dans un champ gueur L et ayant une charge Q, est placée à l'intérieur d'une surface de Gauss sphérique, comme le montre la figure 3.58. L'aire totale de la surface est A. Voici deux énoncés qui se rapportent à cette situation : électrique . La base du cube est située dans le plan des xy entre la position y = 10,0 cm et y = 20,0 cm (voir la figure 3.56). a. Calculez le flux électrique qui traverse chaque surface du cube. b. Calculez le flux net à travers le cube. (I) Le flux électrique qui traverse cette surface de Gauss est $\Phi_E = Q/\varepsilon_0$. (II) Le module du champ électrique pour n'importe quel point sur la surface de la sphère est c. Calculez la charge à l'intérieur du cube. Déterminez les énoncés qui sont vrais. (i) (I) seulement ; (ii) (II) seulement ; (iii) (I) et (II) ; FIGURE 3.56 • Problème 18 (iv) aucun des deux ; (v) il manque des informations pour se prononcer. Section 3.4 Le théorème de Gauss en action Q19 À la figure 3.57, une tige infinie a une charge linéique +λ. Cette tige est entourée de trois surfaces fermées différentes qui ont toutes une longueur L parallèle à la tige chargée. Parmi ces surfaces, déterminez celle dont le flux électrique qui la traverse est $\Phi_E = \lambda L/\varepsilon_0$: (i) le cylindre seulement ; FIGURE 3.58 • Question 21 (ii) la sphère seulement ; (iii) le cube seulement ; (iv) le cylindre et la sphère ; (v) les trois surfaces. Q22 Une sphère a un rayon a = 2,0 cm. Elle se trouve au centre d'une sphère creuse, de rayon intérieur b = 4,0 cm et de rayon extérieur c = 6,0 cm. La petite sphère a une charge Q_1 uniformément distribuée dans son volume, et la sphère creuse a une charge Q_2 uniformément distribuée sur sa surface extérieure, comme le montre la figure 3.59 (voir la page suivante). a.
On veut calculer le champ électrique à une distance de 5,0 cm du centre des sphères, à l'aide du théorème de Gauss. Quel est le rayon de la surface de Gauss nécessaire ? FIGURE 3.57 • Questions 19 et 20 Q20 En vous référant à la figure 3.57, déterminez la sur- face de Gauss qui permet de trouver facilement le champ électrique au point P, illustré sur chaque surface, à l'aide du théorème de Gauss : b. Quelle est la valeur de Q int ? c. Quel est le rayon de la sphère de Gauss nécessaire pour calculer le champ électrique à une distance de 10 cm du centre des sphères ? d. Quelle est alors la valeur de Q int ? 114 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES concentriques (voir la figure 3.60).
Déterminez le champ électrique dans les quatre situations décrites ci-dessous.
a. r < a b. a < r < b c. b < r < c FIGURE 3.59 • Question 22 d. r > c E23 Deux grandes plaques verticales minces et isolantes, e. Pour quelles distances (autres que l'infini) le champ électrique est-il nul ? ayant chacune une charge surfacique −σ, sont placées horizontalement, face à face. Elles sont séparées par une distance d l'une de l'autre. Calculez le module du champ électrique à l'aide du théorème de Gauss : a. à gauche des deux plaques ; b. entre les deux plaques ; c. à droite des deux plaques. E24 À l'aide du théorème de Gauss, déterminez le champ électrique, à une distance r de l'axe, à l'extérieur d'un long cylindre de rayon R chargé positivement, dont la charge surfacique σ est uniforme. FIGURE 3.60 • Problèmes 28 et 29 P29 Une sphère, de rayon a = 15,0 cm, a une charge positive a. à une distance de 2,00 cm de son centre ; Q = 32,0 nC répartie uniformément dans son volume. Autour de cette sphère, une sphère creuse, de rayon intérieur b = 25,0 cm et de rayon extérieur c = 30,0 cm, a une charge négative −64,0 nC répartie uniformément dans son volume. Les deux sphères sont concentriques (voir la figure 3.60). Déterminez le champ électrique dans les quatre situations décrites ci-dessous. b. à une distance de 6,00 cm de son centre. a. r = 12,0 cm P26 Une longue tige rectiligne, ayant une charge linéique b. r = 20,0 cm E25 Une sphère isolante a un rayon de 4,00 cm, et sa charge volumique est de 179 μC/m3. Calculez le module du champ électrique : de −240 nC/m, est placée de façon verticale, et possède un diamètre de 60,0 cm. À l'aide du théorème de Gauss, trouvez le champ électrique produit par la tige à une distance de 1,80 m à droite du centre de la tige. P27 Deux grandes plaques isolantes sont placées de façon parallèle, l'une au-dessus de l'autre. La plaque supérieure possède une charge surfacique de 5,7 nC/m2, tandis que la plaque inférieure possède une charge surfacique de −7,3 nC/m2. À l'aide du théorème de Gauss, trouvez le champ électrique : c. r = 27,0 cm d. r = 35,0 cm e. Pour quelles distances (autres que l'infini) le champ électrique est-il nul ? P30 Un long cylindre a un rayon a et une charge volu- c. en dessous de la plaque inférieure. mique uniforme ρ. Il est placé au centre d'un long cylindre creux coaxial, dont le rayon intérieur est b et le rayon extérieur est c. Pour le cylindre creux, la charge est répartie uniformément sur ses surfaces : la charge surfacique sur la surface intérieure est σ_1 et la charge surfacique sur la surface extérieure est σ_2. Les cylindres sont isolants, et ils sont illustrés à la figure 3.61 à la page suivante. Déterminez le champ électrique : P28 Une sphère, de rayon a, a une charge positive Q a. à r < a de l'axe ; répartie uniformément dans son volume. Autour de cette sphère, une sphère creuse, de rayon intérieur b > a et de rayon extérieur c > b, a une charge négative −2Q répartie uniformément dans son volume. Les deux sphères sont b. à a < r < b de l'axe ; a. en haut de la plaque supérieure ; b. entre les deux plaques ; c. à b < r < c de l'axe ; d. à r > c de l'axe. QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 115 P33 Une très grande plaque isolante a une charge surfa- cique uniforme positive σ+ positive. On place une seconde très grande plaque isolante, parallèlement à la première, à une distance d.
La seconde plaque a une charge surfacique négative σ−. Calculez le module de la force par unité d'aire exercée sur la seconde plaque par la première. P34 Une sphère de rayon R a une charge volumique qui dépend de la distance du centre de celle-ci : FIGURE 3.61 • Problèmes 30 et 31 où α est une constante. Montrez que le module du champ électrique est P31 Un long cylindre a un rayon a = 12,0 cm et une charge volumique uniforme ρ = 9,55 μC/m3. Il est placé au centre d'un long cylindre creux coaxial, dont le rayon intérieur est b = 26,0 cm et le rayon extérieur est c = 30,0 cm. Pour le cylindre creux, la charge est répartie uniformément sur ses surfaces : la charge surfacique sur la surface intérieure est σ_1 = −0,440 μC/m2, et la charge surfacique sur la surface extérieure est σ_2 = 0,170 μC/m2. Les cylindres, illustrés à la figure 3.61, sont isolants. Déterminez le champ électrique : a. à r = 8,00 cm de l'axe ; b. à r = 20,0 cm de l'axe ; c. à r = 28,0 cm de l'axe ; d. à r = 40,0 cm de l'axe. P32 On place, entre un plan infini isolant chargé et un Section 3.5 Les conducteurs en équilibre électrostatique Q35 Une charge ponctuelle q est placée à l'intérieur d'une sphère creuse métallique.
La sphère métallique a une charge −3q. a.
Quelle est la charge sur la surface intérieure de la sphère creuse ? b. Quelle est la charge sur la surface extérieure de la sphère creuse ? E36 Une longue tige de cuivre a un rayon de 1,00 cm, et sa charge linéique est de 50,5 nC/m. Calculez le module du champ électrique aux endroits suivants : a. à r = 5,00 mm de l'axe de la tige ; cylindre infini chargé, une bille chargée attachée par une corde au plafond. La bille a une masse de 2,40 g, et la corde forme un angle θ = 9,00° par rapport à la verticale. La bille est à 80,0 cm de chaque élément (voir la figure 3.62). Le plan a une charge surfacique de 3,00 μC/m2. Le cylindre est métallique. Il a un rayon de 1,80 cm, et sa charge surfacique est de −70,0 μC/m2.
b. à r = 5,00 cm de l'axe de la tige. a. Calculez le champ créé par le plan à la position de la bille. E38 Un long câble coaxial est formé d'un cylindre conduc- b. Calculez le champ créé par le cylindre à la position de la bille. c. Déterminez la charge de la bille. E37 Une plaque d'aluminium mesure 40,0 cm de largeur et 60,0 cm de longueur. Elle porte une charge de 4,50 μC. a. Quelle est la charge surfacique de la plaque ? b. Quel est le champ électrique tout juste à l'extérieur de la plaque, près de son centre ? teur intérieur de rayon r_1 ayant une charge surfacique σ_1. Autour de ce cylindre, un cylindre conducteur creux a un rayon intérieur r_2 et un rayon extérieur r_3. Quelle est la charge surfacique de la surface intérieure du cylindre creux ? P39 Une petite bille métallique de rayon a porte une charge Q_1. On place la bille au centre d'une coquille sphérique métallique de rayon intérieur b, dont l'épaisseur est e et la charge, Q_2 (voir la figure 3.63 à la page suivante). Déterminez le champ électrique : a.
à l'intérieur de la bille ; b.
entre la bille et la surface intérieure de la sphère creuse ; c. à l'intérieur de la sphère creuse (pour b < r < b + e) ; FIGURE 3.62 • Problème 32 d.
à l'extérieur de la sphère creuse.
116 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES e. Quelle est la charge surfacique des surfaces intérieure et extérieure de la sphère creuse ? E42 Deux grandes plaques sont placées parallèlement l'une au-dessus de l'autre. La plaque supérieure possède une charge surfacique de 33,0 μC/m2, tandis que la plaque inférieure possède une charge surfacique de −33,0 μC/m2. On insère une feuille de mica entre les deux plaques, dont la constante diélectrique est de 3,5. Quel est le champ électrique à mi-chemin entre les deux plaques ? P43 Le câble coaxial illustré à la figure 3.64 est constitué FIGURE 3.63 • Problèmes 39 et 40 P40 Une petite bille métallique de rayon a = 1,0 mm porte une

charge de −3,0 nC. On place la bille au centre d'une coquille sphérique métallique de rayon intérieur b = 10 mm, dont l'épaisseur est e = 2,0 mm et la charge est de 9,0 nC (voir la figure 3.63). Déterminez le champ électrique dans les quatre situations suivantes : d'un fil de cuivre de 2,0 mm de diamètre entouré d'un cylindre de 5,0 mm de diamètre, dont la constante diélectrique est k = 4,0.
Ce fil est entouré d'un cylindre creux en cuivre de 1,0 mm d'épaisseur. Le cylindre est à son tour entouré d'une gaine extérieure en plastique servant d'isolant.
Déterminez la charge linéique du fil de cuivre, sachant que le champ dans le diélectrique est , exprimé en N/C. a. à 0,80 mm du centre ; b. à 5,0 mm du centre ; c. à 11 mm du centre ; d. à 13 mm du centre. e. Quelle est la charge surfacique des surfaces intérieure et extérieure de la sphère creuse ? Section 3.6 Le champ électrique dans les diélectriques E41 Deux grandes plaques parallèles l'une au-dessus de l'autre. La plaque supérieure possède une charge surfacique +σ, tandis que la plaque inférieure possède une charge surfacique −σ. On insère un diélectrique entre les deux plaques, dont la constante diélectrique est k. Quel est le champ électrique à mi-chemin entre les deux plaques ? FIGURE 3.64 • Problème 43 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 117 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 3.1 a. La rotation autour d'un axe passant par le centre b. La réflexion autour du plan 3.2 (i) = (iii) < (ii) = (iv) Selon le théorème de Gauss, le flux à travers une surface fermée est égal à la charge nette intérieure. La forme et la grandeur de la surface n'ont pas d'importance. 3.3 Aucune Le cube n'est pas suffisamment symétrique afin que le théorème de Gauss puisse être utilisé pour calculer le champ électrique.
3.4 (ii) La charge ponctuelle est à l'intérieur d'une cavité d'un conducteur. Le champ produit par les autres charges est nul à l'intérieur de la cavité, donc 3.5 La force est attractive. Le diélectrique va être polarisé.
Ainsi, la partie positive des dipôles sera plus près de la plaque négative, et la partie négative des dipôles sera plus près de la plaque positive. Ceci produit des forces obliques sur les dipôles de telle sorte que la force résultante sur le diélectrique est attractive.
Chapitre 118 Le potentiel électrique Buts du chapitre Ce chapitre traite de l'énergie potentielle associée à la force électrique. Un important concept y est présenté : le potentiel électrique. Après l'étude de ce chapitre, vous serez en mesure : • de calculer la variation d'énergie potentielle électrique d'un système ; • d'évaluer la différence de potentiel électrique entre deux points ; • d'utiliser l'énergie potentielle électrique et la conservation de l'énergie pour analyser le mouvement de charges ; • de calculer le champ électrique à partir du potentiel ; • de comprendre les sources de potentiel électrique. Préalables Ce chapitre porte sur les concepts d'énergie potentielle et de conservation de l'énergie appliqués aux configurations produisant un champ électrique. Revoyez : • le champ électrique, étudié aux sections 2.1 et 2.2 ; • le mouvement des charges et des dipôles dans un champ électrique, analysé aux sections 2.7 et 2.8 ; • l'énergie potentielle et l'énergie mécanique, présentées aux sections 9.3 et 9.4 du tome 1. 119 La foudre est produite par une différence de potentiel importante entre les nuages et le sol.
120 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique Les premiers chapitres de ce tome portent sur la force entre les charges électriques ainsi que sur le médiateur de cette force, le champ électrique. La force et le champ électrique sont des quantités vectorielles. Dans le tome 1, nous avons vu que le concept d'énergie permet de résoudre certains problèmes plus facilement qu'avec les forces, car l'énergie est une quantité scalaire. La force électrique est semblable à la force gravitationnelle : les deux forces sont des forces à distance, orientées radialement, dont le module décroît avec la distance au carré. Nous allons utiliser cette similitude pour obtenir l'énergie potentielle électrique associée à la position de charges électriques. Il sera alors possible d'analyser le mouvement de particules chargées à l'aide du principe de conservation de l'énergie, une méthode basée sur des scalaires, plus simple que la méthode des forces qui nécessite le recours aux quantités vectorielles. L'utilisation de l'énergie électrique dans la vie de tous les jours est indéniable, que ce soit pour se chauffer, s'éclairer ou se divertir. Les différentes applications utilisent l'énergie électrique et la transforment en un autre type d'énergie dans les circuits électriques. Nous allons étudier les circuits, dans les prochains chapitres, à l'aide du concept de potentiel électrique. Nous verrons dans ce chapitre le lien qui existe entre le champ électrique et le potentiel. Le concept de potentiel va apporter des informations supplémentaires sur les conducteurs en équilibre électrostatique.
4.1 L'énergie potentielle électrique Le travail et l'énergie potentielle FIGURE 4.1 Lorsqu'une charge se trouve parmi une configuration de charges, elle subit une force électrique exercée par les autres charges. Lorsque la charge se déplace, la force électrique effectue un travail. Dans le tome 1, nous avons vu que le travail est un transfert d'énergie au moyen d'une force. Pour une force constante qui est exercée par un agent sur une particule qui a un déplacement rectiligne , le travail est Le travail effectué sur une particule par une force (4.1) où 0° ≤ φ ≤ 180° est l'angle entre les vecteurs et (voir la figure 4.1). Le signe du travail indique si l'énergie est donnée à la particule (W > 0 lorsque 0° ≤ φ < 90°) ou si c'est la particule qui cède de l'énergie à l'agent (W < 0 lorsque 90° < φ ≤ 180°). Lorsque φ = 90°, le travail de la force est nul, et il n'y a pas de transfert d'énergie entre l'agent et la particule. REMARQUE La notation indique le vecteur déplacement plutôt que la notation , utilisée dans le tome 1, pour éviter de la confondre avec la coordonnée radiale r qui apparaît dans l'équation du champ électrique d'une charge ponctuelle. FIGURE 4.2 Le travail pour une force qui change sur une trajectoire curviligne Dans le cas où la force change durant le déplacement ou si celui-ci n'est pas rectiligne, il faut le diviser en éléments de déplacement infinitésimaux , comme le montre la figure 4.2. Le travail pour un déplacement infinitésimal est . Le travail, lorsque la particule se déplace du point i 4.1 — L'énergie potentielle électrique au point f, est obtenu en calculant la somme (donc l'intégrale) de tous les travaux infinitésimaux : (4.2) C'est l'équation générale pour calculer le travail d'une force ; c'est une intégrale curviligne. Pour la plupart des forces, le travail dépend de la trajectoire utilisée. On appelle force conservative une force pour laquelle le travail ne dépend pas de la trajectoire, mais seulement des points initial et final. En particulier, le travail d'une force conservative est nul lorsque la particule revient à sa position initiale. On peut choisir une trajectoire pour simplifier le calcul de l'intégrale de l'équation 4.2 lorsque la force est conservative. Dans le tome 1, nous avons rencontré deux forces conservatives : la force gravitationnelle et la force élastique exercée, par exemple, par un ressort. La force électrostatique exercée entre les charges doit aussi être une force conservative, car elle est mathématiquement similaire à la force gravitationnelle. Les forces conservatives sont les seules auxquelles on peut associer une énergie potentielle. Pour un système qui évolue d'un état initial i à un état final f par l'effet d'une force d'interaction conservative , la variation de l'énergie potentielle du système est (4.3) MISE EN GARDE L'énergie potentielle est associée à un système et non à une particule.
Dans la figure 4.3, une charge q se déplace d'un point initial i à un point final f dans un champ électrique produit par des charges sources non illustrées. Dans cet exemple, les charges sources demeurent immobiles de telle sorte que le champ électrique demeure constant.
La force exercée sur la charge q est , et la variation d'énergie potentielle du système est (4.4) FIGURE 4.3 Comme nous avons vu dans le tome 1, l'énergie mécanique est définie ainsi : Eméc = K + U, où K = mv2/2 est l'énergie cinétique. De plus, lorsqu'un système est fermé et que ses parties interagissent sous l'effet de forces conservatives uniquement, alors l'énergie mécanique est conservée : (4.5) Dans ce cas, il y a une transformation d'énergie cinétique en énergie potentielle, et inversement. REMARQUE Pour alléger, on omet habituellement l'indice « e » afin d'indiquer que ΔUe est une variation d'énergie potentielle électrique lorsque la seule force conservative est la force électrique. L'énergie potentielle du système change lorsque q se déplace. 121 122 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique Le travail extérieur Lorsque le système est soumis à des forces extérieures, l'énergie mécanique n'est plus conservée. En effet, une force extérieure peut effectuer un travail Wext qui change l'énergie mécanique du système : (4.6) Si Wext > 0, l'environnement donne de l'énergie au système. Dans le cas contraire où Wext < 0, c'est le système qui cède de l'énergie à son environnement. Un champ électrique uniforme FIGURE 4.4 Pour comprendre la façon d'utiliser l'équation 4.4 afin d'obtenir la variation d'énergie potentielle électrique, revenons sur l'énergie potentielle gravitationnelle. Dans le tome 1, nous avons étudié l'énergie potentielle gravitationnelle principalement dans des problèmes près de la surface de la Terre. Dans ce cas, le champ gravitationnel produit par la Terre est constant : , où on a orienté l'axe des y vers le haut.
La force d'interaction conservative exercée sur un objet par la Terre est . À la figure 4.4, la variation d'énergie potentielle lorsque l'objet de masse m va de la hauteur yi à une hauteur yf est, selon l'équation 4.3, La variation d'énergie potentielle pour un champ gravitationnel uniforme Lorsque l'objet se déplace vers le haut (à l'opposé du champ gravitationnel), l'énergie potentielle du système objet-Terre augmente (Δy > 0). Dans le cas contraire, quand le déplacement de l'objet est vers le bas (dans le même sens que), l'énergie potentielle du système diminue (Δy < 0). Pour produire un champ électrique uniforme, on charge deux grandes plaques parallèles avec des charges surfaciques uniformes et opposées (voir la section 2.5, page 53). Supposons qu'une charge q se déplace du point initial i au point final f, comme le montre la figure 4.5. Le déplacement de la charge est , qui forme un angle φ par rapport au champ électrique .
Les charges sur les plaques ne sont pas affectées par le mouvement de la charge q, ce qui permet de calculer facilement la variation d'énergie potentielle du système : L'intégrale donne simplement le module du vecteur déplacement reliant le point initial et le point final. On obtient donc la variation d'énergie FIGURE 4.5 L'énergie potentielle du système change lorsque la charge q se déplace dans un champ uniforme. 4.1 — L'énergie potentielle électrique 123 potentielle du système lorsqu'une charge se déplace dans un champ électrique uniforme : (4.7) où 0 ≤ φ ≤ 180° est l'angle entre les vecteurs et . Contrairement au champ gravitationnel, le champ électrique peut être orienté de n'importe quelle façon selon l'orientation des plaques. De plus, la charge q peut être positive ou négative. Selon l'équation 4.7, on obtient les résultats suivants en fonction du mouvement de la charge par rapport au champ électrique. • Pour une charge positive qui se déplace dans un champ électrique, ΔU < 0 quand le déplacement a une composante dans le sens du champ (0 ≤ φ < 90°), et ΔU > 0 lorsque le déplacement a une composante opposée au champ (90° < φ ≤ 180°). • Pour une charge négative qui se déplace dans un champ électrique, ΔU > 0 quand le déplacement a une composante dans le sens du champ (0 ≤ φ < 90°), et ΔU < 0 lorsque le déplacement a une composante opposée au champ (90° < φ ≤ 180°). • Lorsqu'une charge se déplace perpendiculairement au champ électrique (φ = 90°), ΔU = 0. EXEMPLE 4.1 La différence entre un proton et un électron Deux grandes plaques parallèles, séparées par une distance d = 4,30 cm, ont respectivement une charge surfacique σ+ = 24,7 nC/m2 et σ− = −24,7 nC/m2. Un proton est lancé avec une vitesse de 4,50 × 105 m/s vers le bas, comme le montre la figure ci-contre. a. Quelle est la variation d'énergie potentielle lorsque le proton frappe la plaque positive ? b. Quel est le module de la vitesse du proton juste avant que celui-ci frappe la plaque ? c. Si le proton est remplacé par un électron qui se déplace avec la même vitesse initiale, quelle est la variation d'énergie potentielle du système lorsque l'électron frappe la plaque ? d.
Quel est le module de la vitesse de l'électron juste avant que celui-ci frappe la plaque ? SOLUTION Illustrer la situation SOLUTION a. Décortiquer le problème La figure 4.6 montre les plaques, le champ électrique (orienté de la plaque positive vers la plaque négative) et le déplacement . Les masses des particules sont données à l'annexe B. Le déplacement est FIGURE 4.6 Le schéma de la situation pour l'exemple 4.1 (i) 124 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique Identifier les clés Valider la réponse La première clé est que des plaques parallèles ayant des charges surfaciques uniformes produisent un champ uniforme obtenu à l'aide de l'équation 2.29 : Le proton se déplace à l'opposé du champ électrique. Une partie de l'énergie cinétique se transforme en énergie potentielle, ce qui implique que le module de la vitesse diminue. Le proton subit une force électrique opposée à sa vitesse. Nos résultats ont donc du sens. (ii) où σ = σ+. La deuxième clé est l'équation 4.7 qui permet de calculer ΔU d'un système dans lequel une charge se déplace dans un champ uniforme : (iii) Résoudre le problème Nous insérons les équations (i) et (ii) dans l'équation (iii) : SOLUTION c. Décortiquer le problème La variation d'énergie potentielle du système se trouve de la même façon que pour le proton. Nous insérons les valeurs pour la charge de l'électron (q = −e = −1,602 × 10−19 C) et pour la masse de l'électron (me = 9,109 × 10−31 kg). Résoudre le problème Nous insérons les valeurs dans l'équation (iv) : (iv) ce qui donne, en insérant les valeurs : (réponse) (réponse) SOLUTION b. Identifier la clé SOLUTION d. Résoudre le problème Nous obtenons le module de la vitesse finale de l'électron en insérant les valeurs dans l'équation (v) : Comme le système est isolé, et que la force électrique est une force conservative, l'énergie mécanique du système est conservée : (réponse) (v) Valider la réponse Résoudre le problème Nous isolons vf dans l'équation (v) : (réponse) Lorsque l'électron se déplace entre les mêmes points, l'énergie potentielle du système diminue, car en se déplaçant à l'opposé du champ, l'électron subit une force dans le même sens que sa vitesse. Son énergie cinétique augmente en même temps que l'énergie potentielle du système diminue. C'est bien ce que nous obtenons. La variation de vitesse est beaucoup plus grande pour l'électron, car sa masse est beaucoup plus faible que celle du proton. 4.2 — Le potentiel électrique TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 4.1 Une particule positive se déplace dans un champ électrique uniforme (voir la figure ci-dessous) : a. du point a au point b ; b. puis du point b au point c ; c. puis du point c au point d. Pour chaque déplacement, indiquez si la variation d'énergie potentielle du système est positive, négative ou nulle. 4.2 Le potentiel électrique Au chapitre 2, nous avons étudié le champ électrique qui est le médiateur de la force électrique. Le calcul de la force électrique sur une charge se divise en deux étapes : calculer le champ électrique produit par des charges sources, puis calculer la force exercée par le champ sur une charge. Nous allons appliquer une méthode semblable pour l'énergie. Selon l'équation 4.3, la variation d'énergie potentielle électrique d'un système varie lorsqu'une charge q se déplace entre deux points, et cette variation est proportionnelle à la valeur de la charge. On peut donc considérer les charges immobiles comme des charges sources qui produisent le champ électrique. Quand la charge q se déplace, elle passe par des points ayant des potentiels électriques différents. Le potentiel électrique est produit par les charges sources. On définit la différence de potentiel ΔV entre deux points comme la variation d'énergie potentielle par unité de charge que subirait un système constitué de charges sources et d'une charge test q0 lorsque cette charge se déplace entre les deux points : (4.8) La charge q0 est une sonde qui permet d'obtenir la différence de potentiel. La différence de potentiel est une conséquence des charges sources (soit du champ électrique qu'elles produisent) et non de la charge test. À partir de cette définition, il est possible de calculer la variation d'énergie potentielle lorsqu'une charge se déplace entre deux points dans l'environnement de charges sources : on calcule d'abord la différence de potentiel entre les deux points, puis la variation d'énergie potentielle causée par le déplacement de la charge q entre deux points par (4.9) Différence de potentiel 125 126 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique L'unité du potentiel électrique est le volt (V), d'après le nom du physicien italien Alessandro Volta (1745-1827) (voir la figure 4.7), qui est l'inventeur de la première pile. Selon la définition du potentiel, on obtient MISE EN GARDE Faites attention à ne pas confondre les symboles exprimant le volume (V), le potentiel (V) et l'unité des volts (V). FIGURE 4.7 Alessandro Volta (1745-1827), physicien italien Le potentiel à partir du champ électrique On peut calculer la différence de potentiel entre deux points a et b quand on connaît le champ électrique dans l'environnement de ces points. La figure 4.8 illustre une région où il y a un champ électrique produit par des charges sources non illustrées sur la figure. On prend alors une charge test q0, qu'on déplace entre les deux points pour calculer le travail produit par le champ électrique. Comme la force électrique est conservative, on peut choisir n'importe quelle trajectoire qui relie les deux points. La variation d'énergie potentielle du système est, selon l'équation 4.3, FIGURE 4.8 Le calcul de V b − Va à partir du champ électrique En insérant cette équation dans la définition de la différence de potentiel (ΔV = ΔU/q 0), on obtient (4.10) Différence de potentiel Pour simplifier l'intégrale, on choisit un parcours constitué d'éléments de déplacement parallèles à et d'éléments perpendiculaires à . On voit que la différence de potentiel entre deux points dépend directement du champ électrique produit par les charges sources. La différence de potentiel est plus facile à utiliser que le champ électrique, car c'est un scalaire. Dans le cas de la figure 4.9, où le champ est uniforme, il est possible de sortir le champ de l'intégrale pour ainsi obtenir (4.11) FIGURE 4.9 Le calcul de la différence de potentiel entre les points a et b lorsque est uniforme. où est le vecteur déplacement reliant le point a et le point b, et φ est l'angle entre les vecteurs et . Cette équation montre que si le déplacement entre a et b a une composante dans le sens du champ électrique, alors V b < Va. Ceci peut être résumé de la façon suivante : Le champ électrique est orienté vers les points ayant un potentiel plus faible. L'équation 4.11 permet aussi d'exprimer l'unité du champ électrique en fonction du volt (l'unité de la différence de potentiel) et du mètre, car la 4.2 — Le potentiel électrique différence de potentiel se calcule à partir du champ et d'un déplacement. On obtient De façon usuelle, on préfère exprimer le champ électrique en V/m, ce qui est l'équivalent du N/C. À partir du potentiel électrique, on peut réécrire l'équation de la conservation de l'énergie mécanique. Si une charge q se déplace d'un point a à un point b et que le système est isolé, on a (4.12) Cette équation permet de définir une unité d'énergie qui est fréquemment utilisée en physique subatomique, l'électron-volt, symbolisé par eV : L'électron-volt représente la variation d'énergie cinétique acquise par un électron qui se déplace entre deux points ayant une différence de potentiel de 1 V. Électron-volt Donc, pour une différence de potentiel ΔV = 1 V = 1 J/C et q = −e = −1,602 × 10−19 C pour l'électron, on obtient le facteur de conversion : (4.13) L'électron-volt est une unité de mesure d'énergie très utile dans le contexte de la physique moderne parce que cette unité est bien adaptée aux valeurs d'énergie qu'on rencontre. La physique moderne fait partie des sujets d'étude que nous aborderons dans le tome 3. Lorsqu'une force extérieure est appliquée, l'énergie mécanique change. L'équation 4.6 peut s'écrire en fonction de la différence de potentiel : (4.14) EXEMPLE 4.2 L'effet photoélectrique En projetant de la lumière sur une plaque (l'émetteur E), il y a éjection d'électrons. C'est l'effet photoélectrique. Pour mesurer l'énergie cinétique et le module de la vitesse des électrons, on applique une différence de potentiel VC − VE de −4,50 V entre l'émetteur et une seconde plaque (le capteur C), de telle sorte que les électrons sont tout juste arrêtés en arrivant au capteur (voir la figure ci-contre). Tout le système est dans un tube à vide. a. Quelle est l'énergie cinétique initiale des électrons ? Exprimez la réponse en eV et en J. b. Quel est le module de la vitesse initiale des électrons ? SOLUTION Décortiquer le problème Le système est dans le vide, ce qui signifie qu'aucune force extérieure n'est appliquée sur le système (la force gravitationnelle sur les électrons est négligeable). De plus, l'énergie cinétique des électrons au capteur est nulle (KC = 0). 127 128 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique SOLUTION a. Identifier la clé SOLUTION b. Identifier la clé La clé est la conservation de l'énergie mécanique, selon l'équation 4.12 : Nous obtenons le module de la vitesse à l'aide de la définition de l'énergie cinétique : Résoudre le problème L'énergie cinétique des électrons, lorsque ces derniers quittent l'émetteur, est Pour obtenir l'énergie cinétique en eV, il faut garder q sous forme de multiples de la charge élémentaire. Donc, Résoudre le problème Pour trouver la vitesse en m/s, nous devons exprimer l'énergie cinétique dans les unités du SI, c'est-à-dire en joules : (réponse) Pour obtenir l'énergie cinétique en joules, il faut exprimer q en coulombs : (réponse) (réponse) Valider la réponse Dans ce problème, l'énergie cinétique initiale de l'électron se transforme en énergie potentielle électrique du système. Nous reparlerons de l'effet photoélectrique dans le tome 3, lorsque nous examinerons la dualité onde-particule de la lumière. Le point de référence Jusqu'à présent, nous avons étudié la différence d'énergie potentielle et la différence de potentiel. Dans le tome 1, nous avons vu qu'il est souvent utile de définir une fonction énergie potentielle en choisissant un point de référence O où U = 0. Dans le cas de l'énergie potentielle gravitationnelle près de la surface de la Terre, le sol y = 0 est un choix judicieux. Il est possible de choisir un autre point de référence, sans rien changer aux résultats physiques. De même, dans le cas de l'énergie potentielle électrique, on peut définir une fonction énergie potentielle électrique en choisissant un point de référence O, où U = 0. Ce point sera aussi l'endroit où le potentiel électrique sera nul. Le choix du point O est arbitraire, car il ne change pas les résultats physiques. Pour calculer le potentiel électrique au point P en fonction d'un point de référence O, on calcule la différence de potentiel ΔV = VP − VO : (4.15) Comme la force électrique est une force conservative, on peut choisir un parcours entre les deux points qui simplifie le calcul de l'intégrale. La fonction potentiel permet d'écrire l'équation de la conservation de l'énergie mécanique en fonction de l'énergie mécanique initiale et de l'énergie mécanique finale : (4.16) (4.17) 4.2 — Le potentiel électrique EXEMPLE 4.3 129 Le potentiel d'un cylindre infini Un long cylindre conducteur a un rayon R = 10,0 cm, et sa charge est uniformément distribuée sur sa surface. La charge surfacique est σ = 4,50 × 10−9 C/m2.
Selon le résultat de l'exemple 3.4b, le champ électrique dans cette situation est On choisit la surface du cylindre comme point de référence. a.
Trouvez une expression algébrique pour le potentiel à une distance r de l'axe du cylindre. Exprimez le potentiel en fonction de r, R et σ. b. Quel est le potentiel à une distance r = 20,0 cm ? SOLUTION Illustrer la situation Nous présentons à la figure 4.10 le cylindre avec le point P, le point de référence O et le parcours d'intégration avec l'élément . Comme le champ électrique est radial, le parcours le plus simple est un parcours radial, où (réponse) REMARQUE Nous avons utilisé le symbole r′ comme variable d'intégration pour la différencier de la distance r où l'on veut le potentiel. Remarquez aussi que l'expression obtenue est valable pour r > R. FIGURE 4.10 Le parcours d'intégration pour l'exemple 4.3 Décortiquer le problème SOLUTION b. Résoudre le problème Il s'agit de remplacer les valeurs dans l'expression trouvée en a. pour V (r) : SOLUTION a. Identifier la clé (réponse) La clé est l'équation 4.15 : (i) Résoudre le problème Nous remplaçons l'expression du champ donné dans l'énoncé et l'élément : Valider la réponse La valeur négative du potentiel indique que le point P est à un potentiel plus faible que le point de référence situé à la surface du cylindre. Ce résultat est correct, car le champ électrique doit être orienté vers des points de potentiel moins élevés. 130 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique 4.3 Les surfaces équipotentielles Pour illustrer le champ électrique, on a recours à des lignes de champ électrique. Afin de visualiser le potentiel, on trace les surfaces équipotentielles. Pour expliquer cette méthode, nous reprenons l'analogie gravitationnelle avec une méthode bien connue des randonneurs. La figure 4.11a illustre le profil de deux collines rapprochées. Sur une carte en deux dimensions, l'altitude est représentée par des courbes de niveau représentant des points de même altitude, comme à la figure 4.11b.
Si vous suivez une courbe de niveau, vous restez à la même altitude. Par contre, si vous vous déplacez perpendiculairement aux courbes de niveau, vous allez dans la direction où la pente est la plus importante. Finalement, plus les courbes de niveau sont rapprochées, plus la pente est importante. FIGURE 4.11 (a) Le profil en trois dimensions de collines. (b) Les courbes de niveau correspondantes. Il est possible de définir le potentiel gravitationnel comme l'énergie potentielle gravitationnelle par unité de masse. Pour les points près de la surface, ce potentiel est proportionnel à l'altitude. La figure 4.11a représente donc le potentiel gravitationnel des collines, alors que la figure 4.11b montre une coupe transversale de surfaces équipotentielles gravitationnelles. De la même façon, pour une configuration de charges électriques produisant un potentiel électrique, on trace les surfaces équipotentielles. Surface équipotentielle Une surface équipotentielle est une surface dont les points sont tous au même potentiel électrique.
Pour simplifier les schémas, on trace seulement une coupe transversale des surfaces équipotentielles, équivalente à une carte avec des courbes de niveau. Vous devez alors imaginer la forme tridimensionnelle des surfaces équipotentielles, comme un randonneur qui imagine le relief à partir d'une carte avec des courbes de niveau. Lorsqu'on se déplace le long d'une surface équipotentielle, le potentiel ne change pas, quelle que soit la distance qu'on parcourt. Cela implique que le déplacement doit être perpendiculaire au champ électrique, de telle sorte que , ce qui implique que le champ électrique (et donc les lignes de champ) est perpendiculaire aux surfaces équipotentielles. FIGURE 4.12 Les lignes de champ (en bleu) et une coupe transversale des surfaces équipotentielles (en violet) pour un champ uniforme Prenons par exemple un système composé de deux grandes plaques ayant des charges surfaciques opposées. On a vu que ce système produit un champ électrique uniforme entre les plaques, orienté de la plaque positive vers la plaque né gative. Les surfaces équipotentielles doivent donc être des plans. La figure 4.12 4.4 — Le potentiel de charges ponctuelles montre les lignes de champ électrique et une coupe transversale des surfaces équipotentielles.
Le champ électrique est perpendiculaire aux surfaces équipotentielles, et son sens est vers le potentiel plus faible. Si on place une charge positive près de la plaque positive, elle va accélérer vers la droite en suivant une ligne de champ. L'énergie potentielle du système va diminuer à mesure que l'énergie cinétique de la charge augmente. On a ajouté des valeurs numériques aux lignes équipotentielles dans la figure 4.12 pour montrer que les lignes de champ vont des potentiels plus élevés vers les potentiels plus faibles. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 4.2 La figure suivante présente une coupe transversale de surfaces équipotentielles. On place successivement au point b un proton et un électron, tous les deux au repos. a. Vers quel point le proton va-t-il se déplacer ? b. Vers quel point l'électron va-t-il se déplacer ? 4.4 Le potentiel de charges ponctuelles Une charge ponctuelle q produit un champ électrique autour d'elle. Pour calculer le potentiel électrique associé à ce champ, on utilise une charge ponctuelle q, placée à l'origine, et un point P, situé à une distance r de la charge ponctuelle. On doit d'abord choisir un point de référence O où V = 0. Un choix intéressant est r → ∞, ce qui veut dire que le potentiel est nul lorsqu'on est très loin de la charge. La figure 4.13 illustre la charge q et le parcours d'intégration entre le point de référence O (r → ∞) et le point P (situé à une distance r de q). Le champ électrique d'une charge ponctuelle est radial* : FIGURE 4.13 Le parcours choisi est radial . MISE EN GARDE Il est tentant d'ajouter un signe négatif pour , car ce vecteur est orienté vers l'origine. Il faut résister à cette tentation, car l'élément dr′ est déjà négatif lorsqu'on se déplace de l'infini vers le point P. L'orientation de est obtenue par l'ordre des bornes de l'intégrale. * Nous utilisons r′ comme variable d'intégration, car le symbole r est déjà utilisé pour représenter la distance entre q et le point P. Le parcours d'intégration pour le calcul du potentiel d'une charge ponctuelle 131 132 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique On obtient alors : (4.18) Potentiel d'une charge ponctuelle On voit qu'une charge positive produit un potentiel positif qui diminue lorsqu'on s'éloigne de la charge, alors qu'une charge négative produit un potentiel négatif qui augmente (s'approche de zéro) lorsqu'on s'éloigne de la charge. Les surfaces équipotentielles sont des sphères concentriques. La figure 4.14 illustre le potentiel et une coupe transversale des surfaces équipotentielles pour chaque charge. L'équation 4.18 donne aussi le potentiel à l'extérieur d'une sphère uniformément chargée, car le champ électrique est le même que dans le cas d'une charge ponctuelle. Physiquement, c'est la différence de potentiel qui est importante. La différence de potentiel entre le point b (situé à une distance rb de la charge) et un point a (situé à une distance ra de la charge) est (4.19) FIGURE 4.14 Le potentiel et une coupe transversale des surfaces équipotentielles pour : (a) une charge ponctuelle positive ; (b) une charge ponctuelle négative. REMARQUE L'équation 4.18 décrit le potentiel par rapport au point de référence r → ∞. Il est possible de choisir un autre point de référence. Ceci ajoute une constante à l'équation 4.18. Par contre, la différence de potentiel entre deux points est indépendante du point de référence. 4.4 — Le potentiel de charges ponctuelles EXEMPLE 4.4 133 Un proton contre une sphère Un proton est lancé vers le centre d'une sphère immobile, uniformément chargée, de 2,00 cm de rayon. Le potentiel à la surface de la sphère est de 1 500 V. Le proton a une vitesse de 4,4 × 105 m/s lorsqu'il se trouve à une distance de 1,00 m de la sphère. a. Quelle est la charge sur la sphère ? b. À quelle distance de la sphère le proton s'immobilise-t-il ? SOLUTION Illustrer la situation Résoudre le problème Nous traçons d'abord le schéma de la situation initiale et finale, comme l'illustre la figure 4.15. Nous connaissons le potentiel à r = R = 0,020 0 m. Nous isolons Q dans l'équation (i) : (réponse) SOLUTION b. Identifier la clé La clé est la conservation de l'énergie mécanique, car le système sphère-proton est un système isolé qui interagit par la force électrique, une force conservative. Comme la sphère demeure approximativement immobile (sa masse est beaucoup plus grande que celle du proton), nous utilisons l'équation 4.17 : FIGURE 4.15 Schéma de la situation pour l'exemple 4.4 Décortiquer le problème (ii) Résoudre le problème Nous isolons rf en tenant compte que vf = 0 : SOLUTION a. Identifier la clé (réponse) La clé est l'équation 4.18 qui donne le potentiel à l'extérieur d'une sphère uniformément chargée : (i) Valider la réponse La réponse indique que le proton ne frappe pas la sphère : il s'arrête avant d'atteindre la surface. Le proton va ensuite repartir dans l'autre sens.
Ceci est correct, car les charges de même signe se repoussent. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 4.3 La figure suivante montre une coupe transversale de surfaces équipotentielles d'une charge ponctuelle et trois points. Classez, par ordre croissant (du plus négatif au plus positif), les différences de potentiel suivantes : (i) Vc − V b (ii) Vc − Va (iii) V b − Va (iv) Va − Vc 134 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique Le potentiel d'une configuration de charges ponctuelles Défi animé 4.1 Dans un système de deux charges ponctuelles, sur la droite qui relie les deux charges, combien de points peut-on trouver pour lesquels le potentiel électrique est nul, en supposant que ces charges sont de même signe ou de signe opposé ? Lorsqu'une configuration est constituée de plusieurs charges ponctuelles, on calcule le potentiel à un point P en appliquant le principe de superposition. Comme le champ électrique résultant est la somme vectorielle des champs produits par chacune des charges, le potentiel net est égal à la somme algébrique des potentiels produits par chacune des charges. Si r i est la distance entre la charge qi et la position du point P où l'on veut le potentiel, alors on a Potentiel d'une configuration de charges ponctuelles (4.20) Le potentiel est plus simple à calculer que le champ électrique, car dans l'équation 4.20, on doit faire une somme algébrique plutôt qu'une somme vectorielle. Dans l'équation 4.20, le point de référence est de nouveau r → ∞. EXEMPLE 4.5 Le potentiel produit par deux charges Dans la figure ci-contre, une charge q1 = 4,5 nC est placée près d'une charge q2 = −2,5 nC. Calculez le potentiel au point P si a = 12 cm et b = 4,0 cm.
SOLUTION Illustrer la situation Identifier la clé La clé est l'équation 4.20 : Le schéma de la situation est présenté à la figure 4.16. (i) Résoudre le problème Nous remplaçons les valeurs dans l'équation (i) : FIGURE 4.16 Le schéma de la situation pour l'exemple 4.5 Décortiquer le problème (réponse) Valider la réponse Le signe indique que le point P a un potentiel plus élevé que le point à l'infini. Donc, une charge positive qui arriverait de l'infini aurait besoin d'une certaine énergie cinétique initiale ou d'une force extérieure pour se rendre au point P. 4.5 — L'énergie potentielle de charges ponctuelles 4.5 135 L'énergie potentielle de charges ponctuelles Jusqu'à présent, on a supposé qu'une seule charge se déplaçait et que les autres charges (les charges sources) étaient immobiles. Dans certaines situations, plusieurs charges se déplacent, ce qui change l'énergie potentielle du système. Pour analyser ce problème, il faut être capable de calculer l'énergie potentielle selon la position de chaque charge. Voyons d'abord l'énergie potentielle associée à un système de deux charges q1 et q2. On choisit comme point de référence la situation où les charges sont très éloignées l'une de l'autre : q1 à une position fixe et q2 à r → ∞.
Dans cette situation, U = 0. Supposons maintenant qu'on déplace, au moyen d'une force , la charge q2 de sa position initiale à une position où elle se retrouve à une distance r 12 de q1 (voir la figure 4.17). L'énergie potentielle U de la configuration correspond à la variation d'énergie potentielle du système, engendrée par le déplacement de q2 dans le champ électrique de q1 : où ΔV1 est la différence de potentiel produite par la charge q1. Selon l'équation 4.18, on obtient l'énergie potentielle du système (avec r → ∞ comme point de référence) : (4.21) L'énergie potentielle est positive lorsque les charges ont le même signe (et qu'elles se repoussent), et l'énergie potentielle est négative lorsque les charges ont des signes opposés (et qu'elles s'attirent). Pour comprendre la signification du signe dans l'énergie potentielle, on trace les diagrammes d'énergie pour la situation où les deux charges ont le même signe (voir la figure 4.18) et pour la situation où les charges sont opposées (voir la figure 4.19). Dans ces diagrammes, on trace la fonction U en fonction de r 12 (qui est nécessairement positif) et une ligne horizontale représentant l'énergie mécanique. L'énergie cinétique est la différence entre ces deux courbes. FIGURE 4.18 FIGURE 4.19 Le diagramme d'énergie pour deux charges de même signe Le diagramme d'énergie pour deux charges de signes opposés FIGURE 4.17 Le système a une énergie potentielle lorsque les charges sont séparées par une distance de r 12. 136 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique La figure 4.18 montre deux charges identiques qu'on lance l'une vers l'autre, dans le référentiel où le centre de masse du système est immobile. En se rapprochant, les charges ralentissent à cause de la répulsion électrique. L'énergie cinétique se transforme en énergie potentielle électrique. Lorsque r = r min, la droite de l'énergie mécanique rencontre la courbe de l'énergie potentielle.
Toute l'énergie cinétique s'est transformée en énergie potentielle, et les charges sont momentanément immobiles. La distance r min est la distance minimale entre les deux charges. Ensuite, les charges s'éloignent l'une de l'autre. À la figure 4.19, deux charges de signes opposés sont lancées avec des vitesses opposées. Les charges s'éloignent avec un module de vitesse qui diminue. Dans le cas où l'énergie mécanique est négative, les charges vont s'éloigner jusqu'à une distance maximale rmax, où elles sont momentanément arrêtées (dans le référentiel du centre de masse). Ensuite, l'attraction électrique va les ramener l'une vers l'autre. Si l'énergie mécanique est positive, les charges vont ralentir, mais leur énergie cinétique est suffisante pour vaincre l'attraction électrique, et elles vont pouvoir se rendre jusqu'à l'infini. On peut construire un système de trois charges en ajoutant une charge q3, qu'on déplace de l'infini jusqu'à la position désirée, comme à la figure 4.20.
Ceci change l'énergie potentielle du système : FIGURE 4.20 Le calcul de l'énergie potentielle du système de trois charges Énergie potentielle d'une configuration de charges ponctuelles où ΔV est la différence de potentiel entre la position désirée et l'infini produite par les deux autres charges. L'énergie potentielle avant le déplacement était égale à l'énergie potentielle du système des deux charges, donnée par l'équation 4.21. Alors, l'énergie potentielle du système de trois charges est (4.22) Remarquez qu'on peut construire la configuration dans un autre ordre et obtenir le même résultat. Dans le cas où il y a N charges, on calcule l'énergie potentielle pour chaque paire de charges, puis on fait la somme : (4.23) où rij représente la distance entre les charges qi et qj, et la condition i < j est présente pour ne pas compter deux fois la même paire. 4.6 — Le potentiel d'une distribution continue EXEMPLE 4.6 137 La vitesse de libération Deux sphères identiques ont une masse de 20 g et des charges opposées q1 = 28 nC et q2 = −28 nC. On les lance dans des sens opposés, avec une vitesse de module v. Lorsque les sphères sont lancées, elles sont séparées par une distance de 1,0 cm. Quel est le module de la vitesse initiale minimale v pour qu'elles ne reviennent pas l'une vers l'autre ? SOLUTION Illustrer la situation Nous présentons le schéma de la situation, avec l'état initial et l'état final du système, à la figure 4.21. Identifier la clé La clé est la conservation de l'énergie mécanique donnée par l'équation 4.16 : où Résoudre le problème FIGURE 4.21 L'énergie cinétique finale est nulle, car la vitesse des charges est nulle. De plus, l'énergie potentielle finale du système est nulle, car rf → ∞. Nous obtenons Le schéma de la situation pour l'exemple 4.6 Décortiquer le problème Le système constitué des deux charges est fermé, et la force d'interaction est conservative.
Pour que les charges ne reviennent pas l'une vers l'autre, il faut que la distance qui les sépare soit rf → ∞. Le module de la vitesse minimale qu'elles doivent avoir à la fin est une vitesse nulle ( ). Nous remplaçons ensuite les valeurs : (réponse) Valider la réponse Les deux signes négatifs dans la racine carrée se simplifient, comme il se doit. La réponse est positive, car on veut un module. 4.6 Le potentiel d'une distribution continue Lorsqu'une charge est distribuée dans un volume, sur une surface ou le long d'une ligne, on calcule le potentiel à un point P en divisant la distribution continue en éléments de charge dq (voir la figure 4.22 à la page suivante) comme on l'a fait pour calculer le champ électrique. Chaque élément de charge peut être considéré comme une charge ponctuelle, produisant un potentiel dV = k dq/r, 138 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique où r est la distance entre l'élément de charge et le point P. Le potentiel net se calcule à l'aide du principe de superposition. On obtient (4.24) Potentiel d'une distribution continue La stratégie suivante peut être utilisée. STRATÉGIE 4.1 Le potentiel produit par une distribution continue de charge Illustrer la situation FIGURE 4.22 Dessinez l'objet avec un système de coordonnées.
Indiquez bien le point P où vous voulez calculer le potentiel. Sur le schéma, décomposez l'objet en éléments dq pour lesquels vous pouvez calculer le potentiel dV . Le calcul de V (P) Décortiquer le problème • Exprimez l'élément dq en fonction d'une densité de charge : • Exprimez la distance r en fonction de la variable d'intégration et des autres paramètres. Identifier la clé La clé est l'équation 4.24 : Les bornes de l'intégrale correspondent aux limites de l'objet. Résoudre le problème • Si le facteur à intégrer est une somme, écrivez l'intégrale comme une somme d'intégrales. Sortez les constantes de l'intégrale. • Calculez l'intégrale en utilisant au besoin la table d'intégrales de l'annexe E. • Remplacez les bornes de l'intégrale. Valider la réponse Vérifiez l'ordre de grandeur et le signe de la réponse. Il est aussi possible de vérifier le potentiel à une grande distance : si P est très éloigné par rapport aux dimensions de l'objet, celui-ci devient équivalent à une charge ponctuelle et le potentiel . MISE EN GARDE Dans l'équation 4.24, le point de référence est r → ∞. Ceci donne des valeurs finies lorsque la distribution est finie.
Dans le cas d'une distribution infinie, comme un fil infini ou un plan infini, l'équation 4.24 donne une réponse infinie, car le point r → ∞ ne convient pas comme point de référence. Il est préférable, dans ces cas, d'utiliser la méthode de l'exemple 4.3 pour calculer le potentiel. 4.6 — Le potentiel d'une distribution continue EXEMPLE 4.7 139 Le potentiel d'une tige Une tige de longueur L a une charge Q uniformément distribuée sur sa longueur. Calculez le potentiel à une position y au-dessus du centre de la tige. SOLUTION Illustrer la situation Identifier la clé La clé est l'équation 4.24 : Nous présentons le schéma de la situation à la figure 4.23, avec un élément dq situé à la coordonnée x. Nous avons placé l'axe des x parallèlement à la tige, avec l'origine vis-à-vis du centre de celle-ci. (iii) Résoudre le problème Nous sortons λ de l'intégrale, puis en nous référant à la table d'intégrales de l'annexe E, nous obtenons FIGURE 4.23 Pour simplifier la dernière expression, nous utilisons l'identité ln a − ln b = ln(a/b) : Le schéma de la situation de l'exemple 4.7 Décortiquer le problème La charge est uniformément distribuée sur la tige ; alors la charge linéique est λ = Q/L, et l'élément de charge est (i) La distance r entre l'élément dq et le point P est, selon la figure 4.23, (ii) Ici, y est un paramètre, et x varie de x = −L/2 à x = L/2. (réponse) Valider la réponse Le potentiel doit avoir le même signe que la charge Q, quel que soit le signe de y, ce qui est le cas puisque la fonction ln est toujours positive. Il est possible de vérifier que V ≈ kq/y pour y → ∞, mais cette vérification est presque aussi longue que l'exemple.
Remarquez que pour une tige infinie (L → ∞), le potentiel tend aussi vers l'infini. Ceci indique que le point r → ∞ n'est pas un bon point de référence pour une tige infinie. Le potentiel d'un anneau et d'un disque Pour calculer le potentiel à une coordonnée z sur l'axe d'un anneau, de rayon R, uniformément chargé, on doit diviser l'anneau en éléments dq, comme le montre la figure 4.24. Dans ce cas, tous les éléments de charge sont à une distance Le potentiel est alors L'intégrale donne simplement la charge Q de l'anneau. Le potentiel est donc (4.25) FIGURE 4.24 Le calcul du potentiel sur l'axe d'un anneau chargé 140 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique Le potentiel a le même signe que la charge : si l'anneau est chargé positivement (Q > 0), le potentiel est positif, et si l'anneau est chargé négativement, le potentiel est négatif. Remarquez aussi que pour z ≫ R, l'anneau doit ressembler à une charge ponctuelle. Selon l'équation 4.25, on obtient, dans ce cas, ce qui est bien le potentiel d'une charge ponctuelle.
La figure 4.25 illustre un disque de rayon R ayant une charge surfacique σ uniforme. Pour calculer le potentiel à une coordonnée z sur l'axe, on divise le disque en éléments infinitésimaux en forme d'anneau de rayon r et d'épaisseur dr. La charge sur un anneau est Le potentiel dV d'un anneau est obtenu en remplaçant cette charge et le rayon r dans l'équation 4.25 : FIGURE 4.25 Le calcul du potentiel sur l'axe d'un disque chargé Le potentiel du disque complet est obtenu en calculant la somme (c'est-à-dire l'intégrale) sur tous les petits anneaux infinitésimaux, dont les rayons varient de r = 0 à r = R : (4.26) Encore une fois, le signe du potentiel dépend uniquement du signe de la charge surfacique. Cette équation donne le potentiel autant pour un point au-dessus du disque (avec z > 0) que pour un point en dessous du disque (avec z < 0). Pour vérifier si l'équation 4.26 donne l'expression du potentiel d'une charge ponctuelle lorsque z ≫ R, on peut réécrire l'équation ainsi : n Selon l'approximation du binôme (voir l'annexe E), (1 + x) ≈ 1 + nx, on obtient Si une configuration possède plusieurs disques ou anneaux, on trouve le potentiel à l'aide du principe de superposition : (4.27) 4.7 — Le calcul du champ électrique à partir du potentiel 4.7 141 Le calcul du champ électrique à partir du potentiel On a vu à la section précédente qu'il est plus simple de calculer le potentiel que de calculer le champ électrique pour les distributions continues, sauf dans les cas étudiés au chapitre 3 où la symétrie simplifie grandement le calcul. À partir du potentiel, peut-on calculer le champ électrique correspondant ? On a défini la différence de potentiel à partir d'une intégrale du champ électrique à l'équation 4.10. Est-il possible d'inverser cette équation pour obtenir à partir de V ? La figure 4.26 illustre une région où il y a un champ électrique (x, y, z).
Les points a et b sont très rapprochés, de telle sorte que le champ ne change pas. Le vecteur déplacement entre les deux points est infinitésimal : = dx . La différence de potentiel entre ces deux points est Selon le calcul différentiel, la différentielle d'une variable V peut s'exprimer en fonction d'une variable indépendante x de la façon suivante : Ceci implique que Comme les points a et b sont arbitraires, l'élément dx est aussi arbitraire. Cette équation implique alors que (4.28) On peut aussi analyser la différence de potentiel entre les points a et c, reliés par le vecteur déplacement infinitésimal On obtient alors Cette fois-ci, on exprime la différentielle dV en fonction de la variable indépendante y, pour obtenir (4.29) Il est possible de faire la même analyse dans la direction de z pour obtenir Donc, chaque composante du champ électrique est obtenue par l'opposé de la dérivée du potentiel par rapport à la coordonnée correspondante.
Chaque coordonnée est indépendante des autres coordonnées. Les dérivées FIGURE 4.26 On calcule la différence de potentiel entre deux points éloignés de façon infinitésimale. 142 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique sont alors des dérivées partielles, qu'on représente par le symbole ∂. Donc, le champ électrique est donné par (4.30) Champ électrique à partir du potentiel ∇ L'opérateur ∇ désigne une opération vectorielle appelée le gradient de V . Le champ électrique est donc l'opposé du gradient du potentiel.
De façon générale, le gradient permet d'obtenir une quantité vectorielle à partir d'un scalaire non uniforme dans l'espace. REMARQUE Pour calculer une dérivée partielle par rapport à x, on calcule la dérivée par rapport à x en considérant les coordonnées y et z comme des constantes. De même, pour le calcul de la dérivée partielle par rapport à y ou par rapport à z, on calcule la dérivée en considérant les autres coordonnées comme des constantes. Lorsque le potentiel dépend uniquement de la coordonnée radiale r, le champ électrique doit être radial, avec (4.31) Pour calculer le champ électrique d'une configuration complexe, il est plus simple de déterminer d'abord le potentiel à l'aide de l'équation 4.24, car le potentiel est un scalaire. Ensuite, on obtient le champ électrique à l'aide d'une dérivée. EXEMPLE 4.8 Le champ électrique d'un anneau Le potentiel à une position z sur l'axe d'un anneau, de charge Q et de rayon R, est Calculez le champ électrique à la position z. En insérant ce résultat dans l'équation (i), nous obtenons SOLUTION Identifier la clé La clé est l'équation 4.30 : (i) (réponse) Résoudre le problème La dérivée est Valider la réponse C'est bien le résultat obtenu à l'équation 2.22 de la page 54. (ii) 4.7 — Le calcul du champ électrique à partir du potentiel Dans un graphique du potentiel en fonction d'une coordonnée cartésienne, la composante du champ est l'opposé de la pente. Ceci implique que le module du champ est important lorsque le potentiel varie rapidement d'un point à l'autre. Dans le tome 1, nous avons obtenu un résultat semblable dans le graphique de l'énergie potentielle en fonction de la position : la force conservative est l'opposé de la pente. Il est aussi possible d'utiliser ce résultat dans les schémas de surfaces équipotentielles. En effet, plus les équipotentielles sont rapprochées, plus le module du champ sera grand. À la figure 4.27, les surfaces équipotentielles sont plus rapprochées près de la charge ponctuelle, car le champ y est plus intense. 143 FIGURE 4.27 Les surfaces équipotentielles sont plus rapprochées aux endroits où le champ est plus intense. Le module du champ électrique est plus grand lorsque les surfaces équipotentielles sont rapprochées. Le champ est orienté perpendiculairement aux surfaces équipotentielles, et il est orienté vers les surfaces de potentiel plus faible. EXEMPLE 4.9 Un graphique V en fonction de x Le potentiel en fonction de x est présenté dans le graphique ci-contre. Le potentiel dépend uniquement de la coordonnée x. a. Quel est le champ à x = 3,0 cm ? b. Quelle est la force exercée par le champ sur un électron se trouvant à x = 3,0 cm ? SOLUTION a. Identifier la clé SOLUTION b. Identifier la clé La clé est l'équation 4.30, qui peut être écrite de la façon suivante : La clé est l'équation 2.2 de la page 36, en utilisant q = −1,60 × 10−19 C pour un électron : (i) Résoudre le problème Résoudre le problème Pour calculer la pente à x = 3,0 cm, nous prenons les points (1,0 cm ; 40 V) et (4,0 cm ; −20 V) sur le graphique : Nous obtenons (réponse) Valider la réponse (réponse) Le champ électrique a une composante positive, car la pente est négative.
La force est opposée au champ, car l'électron est une particule négative. 144 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 4.4 La figure suivante présente une coupe transversale de surfaces équipotentielles. Tracez le champ électrique correspondant. 4.8 Le potentiel des conducteurs en équilibre électrostatique Le potentiel électrique et sa relation avec le champ électrique vont maintenant nous permettre d'obtenir d'importants résultats supplémentaires sur les conducteurs en équilibre électrostatique. À la section 3.5, nous avons vu entre autres que lorsqu'un conducteur est en équilibre électrostatique, le champ électrique est nul à l'intérieur. De plus, la charge excédentaire doit se trouver sur la surface du conducteur. On veut maintenant calculer la différence de potentiel entre deux points quelconques a et b à l'intérieur du conducteur.
La figure 4.28 illustre le parcours d'intégration utilisé. On obtient (4.32) car sur tout le parcours.
Comme les points choisis sont quelconques : FIGURE 4.28 Le calcul de la différence de potentiel à l'intérieur d'un conducteur Tous les points d'un conducteur en équilibre électrostatique sont au même potentiel. Ceci inclut la surface du conducteur. Donc, la surface du conducteur est une surface équipotentielle. On peut alors dire que le conducteur est à un potentiel donné. Il est intéressant d'étudier comme exemple le cas d'une sphère conductrice de rayon R, qui porte une charge Q. On sait que le champ à l'extérieur de celle-ci est équivalent au champ d'une charge ponctuelle, ce qui implique que le potentiel à l'extérieur est le même que le potentiel d'une charge ponctuelle. Pour un point de référence à l'infini, le potentiel à un point P situé à une distance r du centre de la sphère est Le potentiel est constant à l'intérieur, et il est égal au potentiel à la surface. On obtient donc le potentiel d'une sphère conductrice de rayon R : (4.33) 4.8 — Le potentiel des conducteurs en équilibre électrostatique La figure 4.29 montre le graphique du potentiel et le graphique du module du champ éléctrique en fonction de la distance r par rapport au centre de la sphère. Remarquez que le potentiel a la même valeur des deux côtés de la surface, alors que le module du champ change très rapidement à la surface, de zéro à kQ/R 2. (a) (b) FIGURE 4.29 (a) Le potentiel et (b) le champ en fonction de la distance au centre de la sphère conductrice Dans le cas d'un conducteur non sphérique, le module du champ électrique à l'extérieur est plus complexe que le champ d'une charge ponctuelle, comme c'est le cas pour un conducteur sphérique. Pour modéliser qualitativement le comportement d'un conducteur de forme irrégulière, on prend deux sphères conductrices qui sont reliées par un long fil conducteur, comme le montre la figure 4.30. Les deux sphères et le long fil ne forment alors qu'un seul grand conducteur non sphérique, au même potentiel. La petite sphère a un rayon R1 et une charge Q 1, et la grande sphère a une charge Q 2 et un rayon R 2 > R 1. Puisqu'elles sont au même potentiel, (4.34) FIGURE 4.30 Deux sphères conductrices reliées par un conducteur sont au même potentiel. La plus petite sphère porte une charge plus faible que la grande sphère. Le potentiel est le même, mais le champ électrique à la surface de chaque sphère est différent. Pour un conducteur, on a vu à la section 3.5 que le module du champ tout juste à l'extérieur d'un conducteur est E = σ/ 0. On obtient alors Pour une sphère conductrice, la charge est uniformément distribuée (σ = Q/[4πR 2]), ce qui donne 145 146 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique En remplaçant le résultat de l'équation 4.34, on obtient (4.35) La petite sphère produit donc un plus grand champ électrique sur sa surface extérieure que la grande sphère.
Les objets conducteurs non sphériques n'ont pas des charges uniformément distribuées sur leur surface. Toutefois, l'exemple des sphères montre que vis-à-vis des endroits pointus, équivalents à des sphères de petit rayon, le module du champ tout juste à l'extérieur est plus grand. C'est ce qu'on appelle l'effet de pointe. Lorsque le module du champ électrique atteint une certaine valeur, appelé le champ disruptif, il commence à ioniser les molécules d'air. L'air devient donc conducteur, et il y a un mouvement de charges entre le conducteur et l'air. C'est l'effet couronne, aussi appelé l'effet corona (voir la figure 4.31), car la décharge est accompagnée de lumière lorsque des électrons se recombinent aux ions positifs. FIGURE 4.31 L'effet couronne autour de l'anneau de protection d'un isolateur d'une ligne à haute tension. L'effet couronne est utilisé pour produire des ions à l'aide d'une pointe métallique.
Par exemple, les filtres électrostatiques transfèrent une charge aux grains de poussière, puis ceux-ci traversent un champ électrique perpendiculaire au mouvement de l'air. L'effet couronne est aussi utilisé dans les photocopieurs et les systèmes de peinture pour les surfaces métalliques, afin de charger les gouttelettes de peinture. L'effet permet aussi la réduction de charge de façon graduelle pour éviter une décharge incontrôlée sur les ailes d'avion. L'effet couronne doit être minimisé dans les composantes électriques (transformateurs, moteurs, condensateurs), car elle peut les endommager. De même, il faut en tenir compte dans la conception des lignes de transmission à haute tension. Dans le cas où le champ est intense sur une longue distance, il y a un arc électrique. C'est ce qui se produit durant un orage électrique. Le champ électrique entre un nuage et un point de la surface de la Terre devient suffisamment important pour qu'une décharge se produise entre ces deux points. L'effet de pointe fait qu'il est plus probable que l'éclair frappe un objet pointu en hauteur, comme la cime d'un arbre (voir l'ouverture du chapitre, page 119). Pour éviter de telles décharges sur les édifices en hauteur, on utilise un paratonnerre, composé d'une tige métallique reliée au sol par un conducteur et située au sommet de l'immeuble. La tige du paratonnerre doit être plutôt arrondie pour qu'un effet couronne se produise entre la tige et l'air ambiant, ce qui diminue graduellement la charge et le champ électrique près de l'édifice.
S'il y a quand même un arc électrique, alors le conducteur relié à la terre va protéger l'édifice du mouvement important de charges électriques. Deux conducteurs en contact À la section 1.3, nous avons vu que lorsque deux conducteurs chargés sont mis en contact ou reliés par un fil conducteur, la charge est transférée d'un conducteur à l'autre. On a maintenant ce qu'il faut pour obtenir la configuration finale. Étant donné que deux conducteurs en contact forment un seul conducteur, ceux-ci auront le même potentiel lorsqu'ils sont en équilibre. Comme le montre la figure 4.32, le premier conducteur a une charge Q 1i et un potentiel V1i avant 4.8 — Le potentiel des conducteurs en équilibre électrostatique 147 FIGURE 4.32 Lorsque deux conducteurs sont mis en contact, la charge se distribue pour que les conducteurs soient au même potentiel. le contact, et le deuxième conducteur a une charge Q2i et un potentiel V2i avant le contact. Alors, après le contact, (4.36) De plus, la charge doit être conservée. Alors, (4.37) Ces deux équations permettent de calculer deux inconnues, par exemple la charge de chaque conducteur après le contact. EXEMPLE 4.10 Deux nouvelles sphères en contact Deux sphères conductrices ont des rayons respectifs de 3,00 cm et de 1,80 cm. Elles ont initialement une charge de 40,0 nC chacune. On les met en contact, puis on les éloigne. Quelle est la charge sur chaque sphère après le contact ? SOLUTION Illustrer la situation Décortiquer le problème Le schéma de la situation est présenté à la figure 4.33. Identifier les clés La première clé est l'équation 4.33 qui permet de calculer le potentiel à la surface d'une sphère : (i) La deuxième clé est l'équation 4.36, qui indique que les deux sphères sont au même potentiel après le contact : (ii) La troisième clé est le principe de conservation de la charge, donné par l'équation 4.37 : (iii) Résoudre le problème Insérons l'équation (i) dans l'équation (ii) : FIGURE 4.33 Le diagramme de la situation pour l'exemple 4.10 (iv) 148 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique Selon l'équation (iii), nous avons (réponse) (v) Nous insérons l'équation (v) dans l'équation (iv) : Nous obtenons la charge finale de la deuxième sphère en insérant le résultat précédent dans l'équation (v) : (réponse) Valider la réponse La plus grosse sphère a une charge plus grande, comme il se doit. De plus, l'équation (v) est vérifiée. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 4.5 Trois sphères conductrices sont reliées par un fil conducteur, comme le montre la figure suivante. Classez les sphères par ordre croissant, selon : a. le potentiel ; b. la charge ; c. le module du champ à l'intérieur ; d. le module du champ tout juste à l'extérieur. 4.9 Les sources de différence de potentiel Dans les prochains chapitres, nous allons étudier les circuits électriques dans lesquels les charges électriques (habituellement les électrons) se déplacent en fonction de la différence de potentiel présente dans le circuit. Nous avons vu dans ce chapitre que pour produire une différence de potentiel, il faut rapprocher des charges de même signe pour qu'elles soient près l'une de l'autre, afin d'obtenir une énergie potentielle électrique qui peut ensuite être transformée en énergie cinétique ou en d'autres formes d'énergie. Pour déplacer des charges positives vers un potentiel plus élevé ou pour déplacer des charges négatives vers un potentiel plus faible, il faut une force extérieure qui va effectuer un travail. Ce travail va transférer de l'énergie d'une source extérieure au système. Le générateur de Van de Graaff Le générateur de Van de Graaff, présenté à la figure 4.34a, est un appareil utilisé dans les démonstrations d'électrostatique.
Il a été développé par le physicien américain Robert Van de Graaff (1901-1967) pour produire des hautes tensions et concevoir un accélérateur de particules utilisé en physique nucléaire. 4.9 — Les sources de différence de potentiel Un schéma du générateur est présenté à la figure 4.34b. Ce dernier est constitué d'une sphère métallique en haut d'un tube isolant. Dans le tube se trouve une grande courroie isolante en mouvement grâce à un moteur. Dans le bas du générateur, une électrode en pointe est soumise à une différence de potentiel élevée. Ceci permet de produire des ions positifs qui sont repoussés sur la courroie. Le mouvement de la courroie déplace les ions positifs vers la sphère conductrice. La charge est transférée de la courroie vers la sphère conductrice, de nouveau par effet couronne, à l'aide d'une deuxième électrode reliée à la sphère. La charge se distribue alors sur la surface extérieure de la sphère. Ainsi, il y a une différence de potentiel entre la sphère positive et le sol neutre. (a) (b) FIGURE 4.34 (a) Un générateur de Van de Graaff. (b) Un schéma simplifié du générateur de Van de Graaff. Les charges positives situées sur la surface de la sphère produisent un champ électrique vers le bas du tube isolant. La courroie transporte des charges positives de façon mécanique vers d'autres charges positives, à l'opposé du champ électrique. Durant ce déplacement, la force électrique produit un travail négatif. Il faut donc appliquer une force extérieure pour effectuer un travail positif. C'est le rôle du moteur situé à la base du générateur. Ceci montre qu'un appareil produit une différence de potentiel en déplaçant des charges électriques à l'opposé de la force électrique. Les appareils utilisés en classe peuvent atteindre des différences de potentiel de l'ordre de 100 kV. Le plus gros générateur à l'air libre, construit par Van de Graaff lui-même, se trouve au Boston Museum of Science, et possède deux sphères de 4,5 m en contact (voir la photo d'ouverture du chapitre 3, à la page 81). Il peut produire une différence de potentiel de l'ordre de 2,5 MV. Les piles et les générateurs La source de potentiel souvent utilisée dans les circuits est la pile. Une pile est constituée d'un électrolyte et de deux électrodes (les bornes) faites de métaux différents. Les réactions chimiques produisent un déplacement d'ions positifs vers la borne positive et un déplacement d'ions négatifs vers la borne négative, comme le montre la figure 4.35. On peut dire que les réactions chimiques jouent le rôle de la courroie du générateur de Van de Graaff, en déplaçant des charges à l'opposé de la force électrique qu'elles subissent. Il y a conversion d'énergie chimique en énergie potentielle électrique. FIGURE 4.35 Le schéma d'une pile 149 150 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique Pour déplacer une charge positive de la borne négative à la borne positive, les réactions chimiques effectuent un travail Wpile. Ce travail dépend de la réaction chimique et des substances utilisées comme électrodes et comme électrolyte. On définit la f.é.m. E (un E stylisé) de la pile comme le travail par unité de charge effectué : (4.38) f.é.m. La f.é.m. se mesure en J/C = V. Si une charge q se déplace de la borne négative à la borne positive, la pile effectue un travail Wpile = qE, ce qui se transforme en énergie potentielle électrique ΔU = q ΔVpile. Pour une pile idéale, toute l'énergie électrique est transformée en énergie potentielle électrique et on a : (4.39) Pour une pile idéale, la f.é.m. correspond à la différence de potentiel à ses bornes.
Les piles réelles ne convertissent pas complètement l'énergie chimique en énergie potentielle électrique, et il y a une différence entre E et ΔVpile. Nous reparlerons des piles réelles au chapitre 7. REMARQUE L'abréviation f.é.m. vient du terme « force électromotrice », une expression ancienne qui date de l'époque où on ne comprenait pas vraiment le mouvement des charges électriques. La f.é.m. n'est pas une force, mais bien un travail par unité de charge, et elle est mesurée en volts. La différence de potentiel produite par une pile est de l'ordre de quelques volts. Pour obtenir une plus grande différence de potentiel, il est possible d'associer plusieurs piles l'une à la suite de l'autre. Lorsque ce groupement de piles est placé dans un boîtier, on obtient une batterie. Il est possible de transformer d'autres types d'énergie en énergie potentielle électrique. Dans une cellule photovoltaïque, c'est l'énergie lumineuse qui est transformée en énergie électrique. Le principe de fonctionnement sera vu dans le tome 3, lorsqu'on étudiera la physique moderne. De même, un générateur transforme l'énergie cinétique en énergie potentielle électrique. Les générateurs sont utilisés, entre autres, dans les centrales électriques et les éoliennes. Nous en reparlerons au chapitre 10. Une pile, un générateur et une cellule photovoltaïque ne fonctionnent pas de la même façon, mais ils produisent tous une différence de potentiel en déplaçant des charges électriques. Ceci s'effectue en transformant de l'énergie non électrique en énergie électrique.
Ces appareils sont appelés les sources de f.é.m. Le travail par unité de charge qu'ils produisent est la f.é.m. E.
Dans les schémas de circuits électriques, on représente les sources de f.é.m. par le symbole , où la ligne plus courte indique la borne négative et la ligne la plus longue, la borne positive. 4.10 — L'énergie potentielle associée à un dipôle dans un champ électrique 4.10 L'énergie potentielle associée à un dipôle dans un champ électrique Rappelons

qu'un dipôle constitué d'une charge +q et d'une charge −q séparées par le vecteur (qui va de la charge négative vers la charge positive) est caractérisé par son moment dipolaire . À la section 2.8, nous avons vu que lorsqu'un dipôle électrique est dans un champ électrique uniforme, il subit un moment de force qui tend à aligner le moment dipolaire dans le même sens que le champ électrique. Selon le résultat obtenu à la section 12.4 du tome 1, l'agent qui exerce le moment de force effectue un travail sur un objet qui effectue un déplacement angulaire. La figure 4.36 montre un dipôle dans un champ électrique uniforme . Le moment de force exercé par le champ fait tourner le dipôle d'un angle initial φ i jusqu'à un angle final φ f. Selon l'équation 2.40 de la page 68, le moment de force exercé par le champ est Le signe négatif est présent, car dans la situation illustrée à la figure 4.36, le moment de force est dans le sens horaire (pour aligner sur , donc τz < 0). FIGURE 4.36 Entre l'état initial et l'état final, le champ électrique effectue un travail. Selon l'équation 12.6 du tome 1, le travail effectué est (où, p et E sont des constantes. Il ne reste qu'à intégrer la fonction sinus à l'aide de la table d'intégrales de l'annexe E : (4.40) On voit que le travail ne dépend pas de la trajectoire, mais seulement de l'angle initial et de l'angle final entre et .
Ceci permet de définir l'énergie potentielle du système charges sources+dipôle, associée à l'orientation du dipôle. 151 152 CHAPITRE 04 — Le potentiel électrique En utilisant l'équation 4.3 de la page 121, on obtient la variation de l'énergie potentielle du système lorsque l'orientation du dipôle change : (4.41) Pour simplifier, on choisit φ i = 90° comme point de référence, où U = 0. En faisant ce choix, la fonction énergie potentielle du système est (4.42) Énergie potentielle d'un dipôle où φ est l'angle entre le moment dipolaire et le champ électrique .
La figure 4.37 montre le diagramme d'énergie d'un dipôle dans un champ électrique. L'énergie potentielle est minimale à φ = 0°.
Cela représente le point d'équilibre stable, avec τz = 0. Le point θ = 180° est un point d'équilibre instable, car τz = 0 à cet angle, mais si l'angle est légèrement différent, le dipôle va tourner vers θ = 0°. En traçant la ligne de l'énergie mécanique, on obtient les bornes, c'est-à-dire les angles où le mouvement de rotation du dipôle change de sens. FIGURE 4.37 Le diagramme d'énergie pour un dipôle dans un champ électrique TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 4.6 Un dipôle immobile a un moment dipolaire qui forme un angle φ = 178° par rapport à un champ électrique uniforme. On le laisse aller. On observe le dipôle dans les situations où l'angle φ prend les valeurs suivantes : (i) φ = 90°, (ii) φ = 20°, (iii) φ = −30°, (iv) φ = −120°. Classez les situations selon un ordre décroissant : a. de l'énergie mécanique du système ; b. de l'énergie potentielle du système ; c. de l'énergie cinétique de rotation du dipôle.
RÉSUMÉ 153 RÉSUMÉ Dans ce chapitre, nous avons vu comment calculer le potentiel électrique pour analyser le mouvement des charges à l'aide de l'énergie. LES DÉFINITIONS • Le potentiel électrique est produit par les charges électriques. • La différence de potentiel entre deux points est obtenue en déplaçant une charge test q0 entre les deux points : Lorsque le champ électrique est connu, • Lorsqu'une charge q se déplace entre deux points, l'énergie potentielle du système change : • Le potentiel électrique au point P est obtenu en choisissant un point de référence O, où V = 0 : • Le champ électrique peut être calculé à partir du potentiel : LES LOIS ET LES PRINCIPES • Lorsqu'un système constitué de charges électriques est isolé, l'énergie mécanique Eméc = K + U ne change pas : • L'énergie potentielle d'une configuration de charges est où le point de référence (où U = 0) est r → ∞. • Lorsque le système est soumis à une force extérieure, l'énergie mécanique du système varie : • L'énergie potentielle d'un système composé d'un dipôle (ayant un moment dipolaire) dans un champ électrique est LES RÉSULTATS Le potentiel, avec r → ∞ comme point de référence • Une charge ponctuelle : • Une distribution continue : • Une configuration de N charges ponctuelles : • Une surface équipotentielle est une surface dont tous les points sont au même potentiel. • Le champ électrique est perpendiculaire aux surfaces équipotentielles et il est orienté vers les surfaces équipotentielles permettent de visualiser le potentiel. • Les surfaces équipotentielles permettent de visualiser le potentiel. • Tous les points d'un conducteur sont au même potentiel. La surface est une surface équipotentielle. • Le champ électrique à l'intérieur est nul. • Le champ électrique à l'extérieur a un plus grand module vis-à-vis des endroits pointus, ceux-ci ayant des petits rayons de courbure. • Lorsque deux conducteurs sont mis en contact, les charges se distribuent pour que les deux conducteurs soient au même potentiel. LES APPLICATIONS Les conducteurs en équilibre électrostatique • Une source de f.é.m. transforme une forme d'énergie en énergie potentielle électrique en effectuant un travail. Le travail par unité de charge est la f.é.m. : Pour une source de f.é.m. idéale, E = ΔVsource. QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 154 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Q questions qualitatives • E exercices simples • P problèmes • solution disponible Section 4.1 L'énergie potentielle électrique Q8 Un électron se déplace entre les points et , dans une Q1 Déterminez le signe de la variation de l'énergie poten- région où il y a un champ électrique. Indiquez comment le module de la vitesse de l'électron change dans les situations qui suivent.
tielle du système dans chacune des situations qui suivent.
a. Un électron se déplace dans un champ électrique de sens opposé à son mouvement. a. Vd > Vc b. Un proton se déplace dans un champ électrique de sens opposé à son mouvement. b. Vd = Vc c. Une particule alpha (q = 2e) se déplace dans un champ électrique dans le même sens que son mouvement. E9 Un champ électrique uniforme de 600 V/m est d. Un électron se déplace en orbite circulaire autour d'une charge positive fixe. E2 Quel travail faut-il fournir pour déplacer une charge de 5,0 μC de x0 = 3,0 m à x f = 7,0 m dans un champ électrique uniforme , si la charge est immobile au début et à la fin ? E3 Un électron, initialement au repos, est accéléré par un champ électrique uniforme. Quel est le travail effectué par le champ électrique sur un proton qui a un module de vitesse de 4,50 × 106 m/s ? E4 Un proton est accéléré de 2,50 × 105 m/s à 9,20 × 105 m/s sur une distance de 1,70 m par un champ électrique parallèle à sa vitesse. a. Quelle est la variation d'énergie potentielle du système ? b. Quel est le module du champ électrique ? E5 Une particule alpha (la charge est q = 2e) se déplace entre deux plaques, de la position à la position . Le champ électrique uniforme est . Quelle est la variation d'énergie potentielle du système ? E6 Un électron est projeté horizontalement à une vitesse vers une cible située 20,0 cm plus loin. On applique un champ électrique . a. Déterminez la variation d'énergie potentielle électrique du système au cours du déplacement de l'électron. b. Quel est le module de la vitesse de l'électron lorsqu'il frappe la cible ? c. Vd < Vc orienté selon un angle de 63° au-dessus de la partie positive de l'axe des x. Déterminez la différence de po tentiel ΔV = V b − Va entre le point a b = −2,0 m et le point a = −2,0 m. E10 Un électron, initialement immobile, est accéléré par une différence de potentiel de 1 000 V. a. Quelle est l'énergie cinétique finale de l'électron ? Exprimez votre réponse en eV et en J.
b. Quel est le module de la vitesse finale de l'électron ? E11 Une particule alpha (q = 2e et m = 4,00 u) est émise par un noyau de radium avec une énergie cinétique de 4,87 MeV. a. Quel est le module de la vitesse de la particule alpha ? b. Quelle est la différence de potentiel nécessaire pour arrêter la particule alpha ? E12 Une charge q = −4,0 μC est déplacée de l'infini au point P, où le potentiel est de −3,8 × 105 V. La charge est immobile au début et à la fin. a. Quel est le travail extérieur nécessaire pour déplacer la charge ? b. Un signe explique le signe de votre réponse ? P13 Un électron est lancé à une vitesse de module de 1,10 × 107 m/s à partir du point central entre deux grandes plaques parallèles (voir la figure 4.38). a. Quelle plaque l'électron va-t-il frapper ? b. Quel est le module de la vitesse de l'électron à l'instant où celui-ci frappe une plaque ? Section 4.2 Le potentiel électrique Q7 Un proton se déplace entre les points a et b, dans une région où il y a un champ électrique. Le module de sa vitesse change durant le trajet. Déterminez le signe de V b − Va dans les situations qui suivent. a. vb = va b. vb > va c. vb < va FIGURE 4.38 • Problème 13 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 155 P14 Un compteur de Geiger-Müller est un détecteur de particules servant à mesurer des rayonnements ionisants comme les rayons X et les rayons gamma. Pour détecter les particules, il est composé d'un long fil métallique (l'anode), de rayon ra, entouré d'un long cylindre creux métallique coaxial (la cathode), de rayon rc (voir la figure 4.39). On gaz à faible pression remplit l'espace entre le fil et le cylindre. L'anode a une charge linéique λ et la cathode a une charge linéique −λ. a. À l'aide du théorème de Gauss, déterminez le champ électrique à l'intérieur du compteur de Geiger-Müller. b.
Quelle est la différence de potentiel Va − Vc ? c. Un certain détecteur a une anode de 1,00 mm de rayon et une cathode de 10 mm de rayon. Quelle est la charge linéique sur l'anode si la différence de potentiel entre l'anode et la cathode est de 1 000 V ? FIGURE 4.40 • Problème 18 Section 4.4 Le potentiel des charges ponctuelles Q19 La figure 4.41 illustre deux charges ponctuelles et cinq points de potentiel nul à mi-chemin entre les charges) sur l'axe des x. Le point de référence, où V = 0, est r → ∞. a. Quels sont les points pour lesquels le potentiel est nul ? b. Existe-t-il des points en dehors de l'axe des x où V = 0, en excluant l'infini ? FIGURE 4.41 • Question 19 Q20 Deux particules ponctuelles de +q et de +2q sont sépa- FIGURE 4.39 • Problème 14 rées par une distance égale à 4d. Considérez les points a, b et c illustrés à la figure 4.42. Classez, par ordre croissant, les différences de potentiel suivantes : (i) Vc − V b P15 Une sphère isolante de rayon R a une charge Q uni- formément distribuée dans son volume. On choisit comme point de référence le centre de la sphère. Le champ électrique à l'intérieur de la sphère est a. Quel est le potentiel à une distance r du centre ? b. Quel est le potentiel à la surface de la sphère ? P16 Une charge ponctuelle q = 3,50 μC se déplace dans un champ électrique . a. Déterminez la différence de potentiel V b − Va entre les points et b. Quelle est la variation d'énergie cinétique de la charge lorsque celle-ci se déplace du point a au point b ? (ii) Vc − Va (iii) Va − V b FIGURE 4.42 • Question 20 E21 Une charge ponctuelle q = −2,0 μC se situe à l'origine. a. Quel est le potentiel V b − Va entre un point à x b = 2,0 cm et un point à x a = 5,0 cm ? b. Quelle est la différence de potentiel V b − Vc entre un point à x b = 2,0 cm et un point à c y c = 5,0 cm ? E22 Trois charges ponctuelles sont fixées aux sommets d'un triangle isocèle, comme l'illustre la figure 4.43. Si V = 0 à l'infini, calculez le potentiel au point P. Section 4.3 Les surfaces équipotentielles Q17 Quel est le travail extérieur nécessaire pour déplacer une charge q à vitesse constante le long d'une surface équipotentielle dont le potentiel est de 10 V ? Q18 La figure 4.40 montre les lignes de champ relatives à un champ électrique. a. Tracez qualitativement les surfaces équipotentielles. b. Classez les points illustrés par ordre croissant selon leur potentiel. FIGURE 4.43 • Exercice 22 156 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES E23 On place quatre charges sur les coins d'un rectangle dont les dimensions sont = 5,0 cm et h = 3,0 cm, comme le montre la figure 4.44.
On suppose que V = 0 à l'infini. a. Trouvez le potentiel au point a.
charges illustrées sont fixes. La force électrique fait déplacer l'électron vers l'infini. Classez les situations par ordre croissant selon l'énergie cinétique de l'électron lorsque celui-ci se trouve très loin des autres charges. b.
Trouvez le potentiel au point b. c. Quel travail est requis pour déplacer une charge de −5,0 μC du point a au point b, si la charge est immobile au début et à la fin ? FIGURE 4.44 • Exercice 23 E24 Deux charges q1 = −q et q2 = +3q sont situées sur l'axe des y et sont séparées par une distance d = 6,00 cm (voir la figure 4.45). On suppose que V = 0 à l'infini. a. Trouvez les points sur l'axe des y où le potentiel est nul. b. Trouvez les points sur l'axe des x où le potentiel est nul. FIGURE 4.47 • Question 26 E27 Un système est constitué de deux charges ponctuelles fixes : q1 = 3,00 μC, située à , et q2 = 2,00 μC, située à . Quel est le travail extérieur nécessaire pour déplacer vers l'origine une charge q3 = −1,00 μC provenant de l'infini si la charge est immobile au départ et à la fin ? E28 Quel travail faut-il fournir pour amener de l'infini trois charges +q, −q et −q respectivement, et les placer sur les coins d'un triangle équilatéral de côté L, comme le montre la figure 4.48 ?
FIGURE 4.45 • Exercice 24 E25 Deux charges ponctuelles q1 et q2, situées sur l'axe des x, sont séparées par une distance de 2,00 m, comme le montre la figure 4.46. Si le potentiel est nul à l'infini et à x = 1,60 m, quelle doit être la relation entre les charges q1 et q2 ? FIGURE 4.48 • Exercice 28 E29 Un cube ayant des arêtes de longueur L possède une charge q à chacun de ses coins (voir la figure 4.49). Quelle est l'énergie potentielle du système ?
FIGURE 4.46 • Exercice 25 Section 4.5 L'énergie potentielle de charges ponctuelles Q26 Un électron immobile est placé à l'origine dans les quatre situations illustrées à la figure 4.47. Les autres FIGURE 4.49 • Exercice 29 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 157 P30 Deux protons sont séparés par une distance de Section 4.6 Le potentiel d'une distribution continue 6,00 fm. On lance un proton sur une particule alpha à partir de l'infini ; celle-ci s'immobilise à mi-chemin entre les deux protons. Quel était le module de la vitesse initiale de la particule alpha ? (La particule alpha a une charge de 2e et une masse de 4,00 u.) Q37 Une tige de longueur L a une charge Q uniformément P31 On maintient fixe une particule de 35,00 μC à l'ori- gine. On place une seconde particule de 63,00 μC à x i = 7,20 cm et on la laisse aller. Les deux particules ont une masse de 20,0 g. Quel est le module de la vitesse de la particule lorsque sa position est à xf = 19,60 cm ? P32 Une charge +q est fixée à l'origine. Une seconde distribuée. Pour V = 0 à l'infini, on veut calculer le potentiel électrique au point P, situé à une distance d à droite de l'origine (voir la figure 4.50). a. Écrivez une expression pour l'élément dq en fonction de la charge de la tige. b. Quelle est la distance entre l'élément dq illustré et le point P ? c.
Écrivez l'intégrale nécessaire pour calculer V, sans la résoudre. particule de charge −q se déplace à vitesse constante autour de la charge Q, sur une trajectoire circulaire de rayon r. 1. Quel travail doit fournir un agent extérieur sur la seconde particule pour augmenter à r 2 le rayon de sa trajectoire ? (Attention, la particule n'a pas la même vitesse sur chacune des deux orbites.) P33 Selon le modèle de Bohr, un atome d'hydrogène est constitué d'un proton fixe et d'un électron qui orbite autour du proton sur des orbites circulaires. L'orbite la plus rapprochée a un rayon de 52,9 pm. Exprimez toutes vos réponses en eV. FIGURE 4.50 • Question 37 Q38 Une tige de longueur L a une charge linéique λ uni- a. Quelle est l'énergie potentielle du système ? forme. Pour V = 0 à l'infini, on veut calculer le potentiel électrique au point P, situé à une distance y au-dessus de l'extrémité de la tige (voir la figure 4.51). b. Quelle est l'énergie cinétique de l'électron autour du proton ? a. Écrivez une expression pour l'élément dq en fonction de la charge linéaire de la tige. c. Quel est le travail extérieur nécessaire pour ioniser l'atome d'hydrogène, c'est-à-dire pour que l'électron se retrouve à l'infini avec une vitesse nulle ? b. Quelle est la distance r entre l'élément dq illustré et le point P ? P34 Deux petites sphères de métal ont un diamètre de 0,50 cm, une masse de 0,500 g et une charge de 1,00 μC. Une des sphères est déposée sur un support isolant.
L'autre sphère est lancée vers la première. Déterminez le module minimal de la vitesse que doit avoir la sphère en mouvement pour qu'il y ait un contact entre les deux sphères. (Vous pouvez considérer que les sphères sont initialement assez éloignées l'une de l'autre pour ne pas interagir entre elles, et vous pouvez négliger la force gravitationnelle.) c.
Écrivez l'intégrale nécessaire pour calculer V, sans la résoudre. P35 On lance un proton à une vitesse de 2,50 × 105 m/s FIGURE 4.51 • Question 38 sur un noyau de plomb, qui est constitué de 82 protons et 126 neutrons. Le proton est initialement très éloigné du noyau de plomb, et ce dernier demeure approximativement immobile. À quelle distance du noyau de plomb le proton s'arrête-t-il ? E39 On courbe une tige en forme de demi-cercle de rayon R. P36 Une particule alpha (q = 2e et m = 4,00 u) et un pro- ton sont séparés par une distance de 20,0 fm, et ils sont immobiles. Quel est le module de la vitesse de chaque particule lorsqu'elles se trouvent très éloignées l'une de l'autre ? comme le montre la figure 4.52 (voir la page suivante). La charge linéique λ est uniforme. Pour V = 0 à l'infini, on veut calculer le potentiel électrique au point P, situé au centre du demi-cercle. a. Écrivez une expression pour l'élément dq en fonction de la charge linéique et du rayon du demi-cercle. b. Écrivez l'intégrale nécessaire pour calculer V, sans la résoudre. c. Calculez l'intégrale pour trouver V au point P. 158 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES FIGURE 4.55 • Problème 42 FIGURE 4.52 • Exercice 39 P40 Un fil uniformément chargé a une longueur de 6,00 m et une charge linéique de 230 μC/m (voir la figure 4.53). On suppose que V = 0 à l'infini.
a. Calculez le potentiel au point P1 si a = 7,00 m. b. Calculez le potentiel au point P2 si R = 4,00 m. c. Quelle est la différence de potentiel V2 − V1, entre les points P2 et P1 ? FIGURE 4.53 • Problème 40 P41 Une tige de 3,00 m a une charge linéique uniforme de 150 μC/m. Une sphère ayant une charge q = −2,50 μC et une masse de 80,0 g est située au point P1, à une distance de 0,500 m de l'extrémité de la tige (voir la figure 4.54). Quel est le module de la vitesse nécessaire pour que la sphère se rende jusqu'au point P2, situé à une distance de 4,00 m de l'extrémité de la tige ? P43 Un anneau de rayon R = 2,50 m possède une charge Q = 300 μC, et il est placé dans le plan de xy à z = 0,00 m. Un disque de même rayon est placé parallèlement à l'anneau, à une hauteur z = 4,20 m au-dessus de l'anneau. Quelle est la charge surfacique du disque pour que le potentiel à mi-chemin entre les deux objets soit nul, en supposant V = 0 à l'infini ? P44 Un précipitateur électrostatique est un appareil servant à filtrer la poussière ou la fumée à l'aide de la force électrostatique. Il est constitué d'un fil central et d'un tube cylindrique de 0,155 m de rayon. Pour ioniser les molécules polluantes, on doit fournir une différence de potentiel qui permet d'avoir un champ électrique d'au moins 3,00 × 106 V/m sur la surface du fil central. Ce champ électrique est nécessaire pour faire perdre un électron aux molécules polluantes (par effet couronne). Ayant perdu cet électron, la molécule se dirige vers le cylindre, qui est négatif. Quelle est la différence de potentiel nécessaire pour faire fonctionner ce précipitateur électrostatique ? Section 4.7 Le calcul du champ électrique à partir du potentiel Q45 La figure 4.56 montre trois régions avec des coupes transversales de surfaces équipotentielles. a. Classez les situations par ordre croissant selon le module du champ électrique.
b. Donnez le sens du champ électrique pour chacune des situations. FIGURE 4.54 • Problème 41 P42 Deux tiges parallèles de longueur L = 6,00 m et de charge linéique λ = 150 μC/m sont séparées par une distance d = 2,00 m, comme le montre la figure 4.55. Les points P1 et P2 sont à mi-chemin entre les deux tiges. On suppose que V = 0 à l'infini. a. Quel est le potentiel au point P1, situé vis-à-vis du centre de chaque tige ? b. Quel est le potentiel au point P2, situé vis-à-vis de l'extrémité de chaque tige ? c. Quelle est la différence de potentiel V2 − V1 entre les points P2 et P1 ? FIGURE 4.56 • Question 45 Q46 La figure 4.57 montre le graphique du potentiel en fonction de x. a. Dans quelles régions le champ électrique est-il nul ? b. Classez les régions par ordre croissant de la composante x du champ électrique (de la plus négative à la plus positive). QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 159 Section 4.8 Le potentiel des conducteurs en équilibre électrostatique Q53 Une sphère conductrice de rayon R1 se trouve au centre d'une épaisse coquille conductrice, de rayon intérieur R 2 et de rayon extérieur R 3. Lequel des graphiques de la figure 4.59 représente correctement le potentiel en fonction de la distance r au centre de la sphère ? FIGURE 4.57 • Question 46 E47 Le potentiel électrique dans une région donnée, en fonction de la position x, est illustré à la figure 4.58. Tracez le graphique de la composante x du champ électrique en fonction de x. FIGURE 4.59 • Question 51 FIGURE 4.58 • Exercice 47 P48 Une charge ponctuelle q = 25,0 μC se trouve à la posi- tion dans une région où le potentiel est V = (35,0x 2 − 24,0yz) × 103, et où les coordonnées sont exprimées en mètres et le potentiel, en volts. Q52 On imagine un conducteur dans un champ élec- trique uniforme. Comment se comportent les éléments qui suivent ? a. Les lignes de champ : (i) s'approchent du conducteur ; a.
Donnez l'expression algébrique du champ électrique. (ii) s'éloignent du conducteur ; b. Quel est le champ électrique à la position de la charge ?
(iii) ne sont pas affectées. c. Quel est le module de la force exercée sur la charge ? P49 Un disque de rayon R a une charge surfacique σ uni- forme. Selon l'équation 4.26, le potentiel à une distance z au-dessus du disque, le long de son axe, est b.
Les surfaces équipotentielles : (i) s'approchent du conducteur ; (ii) s'éloignent du conducteur ; (iii) ne sont pas affectées. E53 Une sphère conductrice de 30,0 cm de rayon a un champ électrique, pour un point situé au-dessus du disque le long de son axe, est donné par l'expression : potentiel de −300 V par rapport au point à l'infini. Calculez la charge à la surface de la sphère. E54 Une sphère conductrice de rayon R a une charge Q. On choisit V = 0 à l'infini. a. Montrez que le potentiel d'un point P1, situé à l'extérieur de la sphère à une distance d du centre, est donné par P50 Un dipôle électrique a un moment dipolaire orienté vers l'axe des y, et il est centré sur l'origine. Le potentiel est b. Montrez que le potentiel d'un point P2, situé à l'intérieur de la sphère à une distance r du centre, est donné par Trouvez l'expression du champ électrique. 160 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES P55 Une sphère conductrice a un rayon R1 = 15,0 cm et E59 Une pile idéale de 1,50 V est branchée à une demi-sphère conductrice, de rayon R 2 = 8,00 cm. Une des sphères a une charge de −25,0 μC. À l'aide d'un long conducteur, on la relie à une deuxième sphère conductrice, initialement neutre, ayant un rayon R 2 = 8,00 cm. Quelle est la charge sur chaque sphère lorsque l'équilibre électrostatique est atteint ? a. Quel est le travail effectué par la pile en 1,00 min ? P56 Deux sphères conductrices très éloignées l'une de l'autre ont des charges respectives Q 1 = 12,0 μC et Q 2 = −18,0 μC. La première sphère a un rayon R1 = 5,00 cm et la seconde, un rayon R 2 = 9,00 cm. On les relie à l'aide d'un long conducteur. a. Quelle est la charge sur chaque sphère lorsque l'équilibre est atteint ? b. En choisissant V = 0 à l'infini, quel est le potentiel au centre de chaque sphère ? c. Combien d'électrons ont été échangés entre les deux sphères ? P57 Une sphère conductrice creuse est neutre. Son rayon intérieur est de 33,0 cm et son rayon extérieur est de 67,0 cm. On place au centre de la sphère creuse une charge ponctuelle Q = 290 μC. On choisit V = 0 à l'infini. électroluminescente de 0,10 W. b. Si la pile fonctionne pendant 20,0 h avant d'être à plat, déterminez la charge qui a circulé à l'intérieur de la pile. E60 Une batterie idéale de 9,0 V est branchée à un moteur qui déplace un bloc de 1,5 kg sur une table horizontale sans frottement. Le bloc, initialement immobile, accélère jusqu'à un module de vitesse de 4,5 m/s. Le moteur utilise 60 % de l'énergie électrique pour déplacer le bloc. a. Quel est le travail effectué par le moteur ? b. Quelle est la charge qui circule dans la pile ?
Section 4.10 L'énergie potentielle associée à un dipôle dans un champ électrique Q61 Une molécule dipolaire, située à l'origine est pla- a. Déterminez le potentiel pour r = 1,0 m. cée dans un champ électrique dont les lignes de champ sont orientées dans le sens opposé à l'axe des y. Pour quelle orientation du moment dipolaire l'énergie potentielle du système est-elle négative ? Donnez l'angle θ du dipôle par rapport à l'axe des x. b. Déterminez le potentiel pour r = 50 cm. E62 Une molécule d'eau a un moment dipolaire de 6,17 c.
Déterminez le potentiel pour r = 20 cm. Section 4.9 Les sources de différence de potentiel maximale du système si la sphère se trouve dans un champ électrique de × 10−30 C · m. Quelle est l'énergie potentielle maximale du système si la sphère se trouve dans un champ électrique de ? E58 Un générateur de Van de Graaff produit une différence de potentiel de 5,00 μC de potentiel de 50,0 kV entre la sphère conductrice et le pied du générateur.
Quel doit être le travail effectué par le moteur pour ajouter une charge de 10,0 μC sur la sphère conductrice ? P63 Un dipôle, formé d'une charge positive de 5,00 μC en présence d'une charge négative de −5,00 μC em , est situé dans un champ électrique uniforme . Quelle est l'énergie potentielle du système ? SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 4.1 a. ΔU < 0 La charge positive se déplace dans le même sens que le champ électrique. b. ΔU = 0 La charge se déplace perpendiculairement au champ électrique. c. ΔU > 0 La charge positive se déplace dans le sens opposé au champ électrique. 4.2 a. Vers le point c b. Vers le point a L'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique : ΔU = q ΔV est négatif, donc le potentiel doit diminuer lorsque q > 0. La charge positive se déplace « naturellement » vers les potentiels plus faibles. L'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique : ΔU = q ΔV est négatif, donc le potentiel doit augmenter pour q < 0. La charge négative se déplace « naturellement » vers les potentiels plus élevés. 4.3 (iv) < (iii) < (i) = (ii) L'énergie potentielle diminue en s'éloignant de la charge positive, alors Vc > Va et Va = V b, car ces points sont sur la même surface équipotentielle. 4.4 Le champ est perpendiculaire aux surfaces équipotentielles, donc il est vertical. Il va des surfaces équipotentielles plus élevées vers les plus basses. La distance entre les surfaces équipotentielles diminue vers le haut, donc le module du champ électrique augmente vers le haut.
4.5 a.
V1 = V2 = V3 Les sphères reliées par le fil conducteur forment un grand conducteur. Le potentiel est le même pour tous les points d'un conducteur en équilibre électrostatique. b. Q 3 < Q 2 < Q 1 La charge sur une sphère conductrice est proportionnelle à son rayon. c. E1 = E2 = E3 Le champ électrique est nul à l'intérieur d'un conducteur en équilibre électrostatique. d. E1 < E2 < E3 Le module du champ tout juste à l'extérieur est plus important pour une sphère dont le rayon est plus petit. 4.6 a.
Toutes égales L'énergie mécanique est conservée, car il n'y a pas de force extérieure sur le système, et la force électrique est conservative. b. (iv) > (i) > (iii) > (ii) L'énergie potentielle du système est U = −pE cos θ. c. (ii) > (iii) > (i) > (iv) C'est l'ordre inverse de celui qu'on a obtenu en b., car K = Eméc − U, avec Eméc qui ne change pas. 161 Chapitre 162 Les condensateurs Buts du chapitre Ce chapitre traite d'un premier élément utilisé dans les circuits électriques : le condensateur. Après l'étude de ce chapitre, vous serez en mesure : • de définir et de calculer la capacité d'un condensateur ; • de calculer l'énergie électrique emmagasinée dans un condensateur ; • d'analyser des circuits qui comprennent plusieurs condensateurs.
Préalables Ce chapitre porte sur l'utilisation des concepts d'énergie potentielle électrique et de potentiel électrique. Revoyez : • le potentiel électrique, expliqué à la section 4.2 ; • le potentiel des conducteurs, étudié à la section 4.8 ; • les sources de différence de potentiel, présentées à la section 4.9 ; • les propriétés des diélectriques, examinées à la section 3.6. 163 Le flash de l'appareil photo utilise l'énergie emmagasinée dans un condensateur. 164 CHAPITRE 05 — Les condensateurs Dans le dernier chapitre, nous avons étudié l'énergie électrique et avons vu qu'un travail est nécessaire pour séparer les charges positives des charges négatives. Ce travail transforme une énergie extérieure en énergie électrique. Dans ce chapitre, nous étudions un dispositif qui permet d'emmagasiner des charges et donc de l'énergie électrique : le condensateur.
Les condensateurs sont des éléments essentiels de plusieurs circuits électriques. Pour fonctionner, le flash d'un appareil photo a besoin d'une quantité d'énergie très rapidement, ce que ne peut pas donner directement une pile. La pile de l'appareil sert plutôt à charger un condensateur, ce qui prend environ une seconde. Ensuite, cette énergie peut être envoyée rapidement vers le flash. De la même façon, un défibrillateur cardiaque a besoin d'une grande quantité d'énergie rapidement pour produire un choc électrique au cœur qui bat de façon irrégulière. Un condensateur permet d'emmagasiner l'énergie nécessaire. On trouve des condensateurs entre autres dans les récepteurs radios, la mémoire des ordinateurs et les adaptateurs de tension utilisés dans plusieurs appareils électroniques. Nous commençons dans ce chapitre l'étude des circuits électriques. Pour l'instant, nous nous limitons encore à l'électrostatique, c'est-à-dire que les situations étudiées sont des configurations où les charges sont en équilibre électrostatique. Nous étudierons les situations avec des charges en mouvement dans les prochains chapitres. 5.1 FIGURE 5.1 Différents condensateurs utilisés dans les circuits électriques La capacité d'un condensateur Les condensateurs prennent différentes formes, comme le montre la figure 5.1. Ils sont conçus pour emmagasiner des charges. Ils sont composés de deux conducteurs, appelés les armatures, séparés par un diélectrique, c'est-à-dire un isolant (le vide ou l'air peut servir d'isolant).
Pour charger un condensateur, on place une charge +Q sur une armature et une charge −Q sur l'autre armature, comme le montre la figure 5.2. Les charges produisent un champ électrique, avec des lignes de champ qui vont de l'armature positive vers l'armature négative. Puisque chaque armature est un conducteur, le potentiel est constant sur chacune des armatures. On peut donc dire qu'il y a une différence de potentiel ΔVC = V+ − V− entre les armatures, ce qui est la conséquence du champ électrique. On définit la capacité C d'un condensateur de façon suivante : Capacité (5.1) Dans le système international, la capacité se mesure en farads (F), en l'honneur du physicien anglais Michael Faraday. Selon la définition de la capacité, on obtient (5.2) FIGURE 5.2 Dans un condensateur, les armatures ont respectivement des charges +Q et −Q. Donc, un condensateur de 1 F aura une charge de 1 C pour une différence de potentiel de 1 V. Ceci correspond à une très grande capacité. Dans les circuits, on rencontre des condensateurs dont la capacité est de l'ordre du picofarad (1 pF = 1 × 10−12 F), jusqu'à une capacité de l'ordre du microfarad (1 μF = 1 × 10−6 F). 5.1 — La capacité d'un condensateur Si on double la charge sur chaque armature, le module du champ électrique va doubler, selon le principe de superposition. Ceci implique que la différence de potentiel sera aussi doublée. Par contre, le rapport entre la charge et la différence de potentiel, c'est-à-dire la capacité du condensateur, ne changera pas.
La capacité du condensateur est une propriété de celui-ci. Elle dépend de la géométrie du condensateur (la forme des armatures, la distance entre celles-ci) et du diélectrique utilisé. REMARQUE La charge nette d'un condensateur est nulle, car il y a une charge +Q sur une armature et une charge −Q sur l'autre armature. Lorsqu'on indique que la charge d'un condensateur est Q, on sous-entend la charge Q sur l'armature positive et non la charge nette du condensateur. Pour charger un condensateur, on peut le brancher sur une pile, comme le montre la figure 5.3. Lorsqu'on branche chaque armature aux bornes d'une pile utilisant un fil conducteur, La figure 5.3 montre un condensateur, composé de deux plaques parallèles, branché à une pile, à deux instants : d'abord à t = 0 où il n'y a pas de charge sur les armatures, puis après un temps assez long. La pile est une source de f.é.m., c'est-à-dire qu'elle produit, entre ses bornes, une différence de potentiel ΔVpile = E, égale à la f.é.m. Ceci produit un champ électrique dans les fils conducteurs. Des électrons de l'armature supérieure vont quitter l'armature du haut, à l'opposé du champ électrique.
De même, des électrons du fil conducteur vont se déplacer vers l'armature du bas. Ceci produit un mouvement de charges, qu'on appelle un courant électrique. La charge de l'armature supérieure devient de plus en plus positive, et la charge de l'armature inférieure devient de plus en plus négative, ce qui diminue le champ électrique résultant. Après un certain temps, le condensateur est complètement chargé, et il n'y a plus de courant électrique. La différence de potentiel aux bornes du condensateur ΔVC est (a) (b) FIGURE 5.3 (a) Un condensateur sans charge est branché à une pile. (b) Lorsque le condensateur est complètement chargé, dans les fils conducteurs. 165 166 CHAPITRE 05 — Les condensateurs Dans ce cas, la plaque positive à le même potentiel que la borne positive de la pile, alors que la plaque négative a le même potentiel que la borne négative. Il n'y a plus de différence de potentiel dans les fils, et le champ électrique dans les fils est nul. Ainsi, il n'y a plus de courant électrique, car les charges ne sont plus en mouvement. Selon la définition de la capacité, indiquée à l'équation 5.1, la charge du condensateur est (5.3) Si on débranche le condensateur de la pile, ce dernier reste chargé. Nous verrons à la section 5.4 que l'énergie potentielle qui pourra être transformée en une autre forme d'énergie dans un appareil. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 5.1 Deux condensateurs identiques sont branchés à des piles. Le premier condensateur est branché à une pile de 3 V et le second, à une pile de 1,5 V. Lorsque les condensateurs sont complètement chargés, déterminez les rapports qui suivent. a. ΔV1 /ΔV2 b. Q 1 /Q2 c. C1 /C2 5.2 Le calcul de la capacité On peut calculer la capacité d'un condensateur à l'aide de la différence de potentiel ΔV entre ses armatures (voir la section 5.3 qui permet de calculer la charge par la différence de potentiel, mais lorsqu'on calcule le champ électrique à partir de la charge, on peut donc calculer la différence de potentiel en fonction de la charge, et donc calculer la capacité. Les étapes à suivre sont les suivantes : • On suppose qu'une armature a une charge +Q et l'autre, une charge −Q. • On trace les lignes de champ électrique, et on calcule le champ entre les deux armatures. • On calcule la différence de potentiel : (5.4) Il est important que la borne inférieure de l'intégrale corresponde à l'armature négative et que la borne supérieure de l'intégrale corresponde à l'armature positive pour que ΔV soit positif.
Défi animé 5.1 Soit un condensateur chargé, non relié à une pile. Qu'arrive-t-il à la différence de potentiel entre les plaques du condensateur quand on change ses paramètres géométriques ? • La capacité du condensateur est C = Q/ΔV . On suppose d'abord que les deux armatures sont séparées par du vide pour calculer la capacité Cvide. On verra ensuite la modification à la capacité lorsqu'un diélectrique sépare les deux armatures, ce qui correspond aux condensateurs réels utilisés dans les circuits. 5.2 — Le calcul de la capacité Le condensateur plan Supposons deux grandes plaques parallèles, dont l'aire est A, séparées par une petite distance d. On place une charge +Q sur l'armature supérieure et une charge −Q sur l'armature inférieure.
La figure 5.4 illustre le champ électrique, qui est uniforme entre les plaques, et un axe des y dont l'origine est sur la plaque vis-à-vis de l'armature négative. Avec le choix de système de coordonnées, l'équation 3.13 donne, pour le champ électrique entre les plaques, (5.5) FIGURE 5.4 Le calcul de la capacité pour un condensateur plan On choisit un parcours d'intégration vertical, qui va de l'armature négative à l'armature positive, comme le montre la figure 5.4, avec .
La différence de potentiel est alors (5.6) La capacité du condensateur plan est donc (5.7) La capacité dépend bien des propriétés géométriques (l'aire et la distance entre les armatures) et non de la charge ou de la différence de potentiel appliquée. On voit aussi que la capacité du condensateur augmente si on utilise des armatures ayant une plus grande aire ou des armatures plus rapprochées. De plus, l'équation 5.7 montre qu'on peut exprimer la constante électrique en F/m : × Un condensateur cylindrique Un condensateur cylindrique est constitué de deux cylindres conducteurs coaxiaux. C'est ce qu'on appelle un câble coaxial. On place une charge +Q sur le cylindre creux extérieur et une charge −Q sur le cylindre intérieur, de rayon b et de longueur L. Les deux cylindres partagent le même axe. Cette configuration est celle du condensateur cylindrique, l'axe des cylindres est inférieure et du rayon b de l'armature inférieure. Selon le chapitre 3, le champ électrique doit être radial (du cylindre positif vers le cylindre négatif), le module ne peut dépendre que de la distance r par rapport à l'axe des cylindres.
La figure 5.5 (voir la page suivante) illustre la surface de Gauss utilisée : un cylindre de rayon r (avec a < r < b) et de longueur . Capacité d'un condensateur plan 167 168 CHAPITRE 05 — Les condensateurs FIGURE 5.5 (a) L'armature interne et la surface de Gauss (l'armature externe n'est pas illustrée). (b) Une coupe transversale du condensateur et de la surface de Gauss.
On calcule le module du champ à l'aide du théorème de Gauss. Le flux à travers les deux bouts de la surface de Gauss est nul, car ils sont perpendiculaires (voir la figure 5.5a). Il ne reste que le flux à travers le côté du cylindre : La charge à l'intérieur de la surface de Gauss est Qint = λ , où λ = −Q/L est la charge linéique du cylindre intérieur. On obtient alors le module du champ électrique à l'aide du théorème de Gauss : Le champ électrique est orienté vers le cylindre intérieur, ce qui donne le champ suivant : (5.8) La prochaine étape consiste à calculer la différence de potentiel entre les deux armatures. On choisit un parcours d'intégration radial, comme l'illustre la figure 5.6 : On obtient alors L'intégrale se calcule facilement à l'aide de la table d'intégrales de l'annexe E : FIGURE 5.6 Le parcours d'intégration pour calculer ΔV (5.9) où on a utilisé l'identité ln b − ln a = ln(b/a). Il ne reste qu'à calculer le rapport entre la charge Q et la différence de potentiel ΔV pour obtenir la capacité du condensateur cylindrique : (5.10) 5.2 — Le calcul de la capacité De nouveau, la capacité dépend uniquement des propriétés géométriques (la longueur et le rayon des armatures). Le condensateur sphérique Un condensateur sphérique est composé d'une sphère creuse conductrice de rayon b et d'une sphère conductrice de rayon a au centre de la sphère creuse. On calcule la capacité de la même façon que dans le cas du condensateur cylindrique, à l'aide du théorème de Gauss et en calculant la différence de potentiel entre les armatures. On trouve que la capacité est donnée par l'expression : (5.11) L'ajout d'un diélectrique Habituellement, on fabrique les condensateurs avec un diélectrique entre les armatures. Ce champ électrique produit par les charges sur les armatures polarise le diélectrique. Comme nous avons vu à la section 3.6, les atomes du diélectrique deviennent des dipôles électriques qui s'alignent sur le champ électrique produit par les charges sur les armatures.
Prenons un condensateur plan sans diélectrique (l'isolant entre les armatures est le vide) qui est déjà chargé, avec une charge +Q sur l'autre armature (voir la figure 5.7a). Ces charges produisent un champ électrique. On insère un diélectrique qui remplit l'espace entre les armatures.
Les dipôles du diélectrique produisent un champ électrique , opposé à (voir la figure 5.7b). Selon l'équation 3.14 de la page 108, le champ résultant est proportionnel au champ créé par les charges sur les armatures : (5.12) où κ est la constante diélectrique du matériau servant de diélectrique.
Cette constante est une caractéristique du diélectrique. La valeur de κ pour quelques diélectriques courants se trouve dans le tableau 5.1 (voir la page suivante) et dans le chapitre 3. (a) (b) FIGURE 5.7 (a) Un condensateur avec du vide est chargé ; le champ est . (b) Le diélectrique est polarisé, ce qui produit un champ . Le champ résultant est plus faible que . Donc, l'ajout d'un diélectrique diminue le champ résultant entre les armatures. Donc, la différence de potentiel entre les armatures diminue d'un facteur κ : (5.13) 169 170 CHAPITRE 05 — Les condensateurs TABLEAU 5.1 Les valeurs approximatives de la constante diélectrique κ et de la rigidité diélectrique E max à 20 °C E max (106 V/m) Air 1,000 59 3 Eau 80,4 Polyéthylène 2,25 16 Polystyrène 2,6 Glycérine 42,5 Porcelaine 6à8 Méthanol 33,6 PVC 3,4 40 Mica 3à6 150 Teflon 2,1 60 Papier 3 16 Verre 4à7 10 à 14 Substance Germanium Substance κ E max (106 V/m) 3,4 Plexiglas 24 La charge sur les armatures n'a pas changé en insérant le diélectrique.
La capacité du condensateur est donc L'ajout du diélectrique fait augmenter la capacité du condensateur, car κ > 1 pour un diélectrique (voir le tableau 5.1). Le champ et la différence de potentiel diminuent lorsqu'on insère un diélectrique. Dans le cas où les condensateurs est relié à une pile, celle-ci effectue un travail lors de l'ajout du diélectrique pour déplacer des charges supplémentaires, jusqu'à ce que la différence de potentiel entre les bornes du condensateur soit ΔV = ΔVpile = ΔVvide. Dans ce cas, on trouve que la nouvelle charge sur l'armature positive est (5.14) La capacité d'un condensateur avec le diélectrique est alors La capacité augmente par le même facteur κ. Donc, quelle que soit la façon dont le diélectrique est inséré, la capacité est Capacité avec un diélectrique (5.15) L'ajout d'un diélectrique a un deuxième effet. Le diélectrique est un isolant tant que le module du champ électrique n'atteint pas une certaine valeur. Si le champ électrique dans le diélectrique est trop intense, le champ ionise les atomes du diélectrique, ce qui produit un claquage (une étincelle) dans le diélectrique. On appelle rigidité diélectrique le module maximal que peut supporter un diélectrique sans claquage. Le tableau 5.1 donne aussi quelques valeurs de rigidité diélectrique. Selon la forme et les dimensions du condensateur, ainsi que la rigidité diélectrique, le condensateur peut être soumis à une différence de potentiel maximale, que le fabricant indique sur le boîtier du condensateur. 5.3 — L'énergie emmagasinée dans un condensateur EXEMPLE 5.1 171 La capacité d'un condensateur Un condensateur plan a des armatures carrées de 6,00 cm de côté, séparées d'une distance de 8,00 μm. Les armatures sont séparées par du teflon. a. Quelle est la capacité du condensateur ? b. Quelle est la différence de potentiel maximale qu'on peut appliquer aux bornes de ce condensateur ? c. Quelle est la charge du condensateur si on applique une différence de potentiel de 120 V à ses bornes ? SOLUTION Nous utilisons le tableau 5.1 pour connaître les valeurs pour le teflon. L'aire des armatures est Dans un condensateur plan, le champ électrique est uniforme.
Nous obtenons alors la relation suivante : (ii) Le signe négatif est annulé par le produit scalaire entre et , car est orienté de l'armature positive à l'armature négative, alors que l'élément de longueur est orienté dans l'autre sens. Identifier la clé La clé est l'équation (ii), qui permet d'écrire (iii) SOLUTION b. Identifier la clé Résoudre le problème La clé est la définition de la capacité. Nous obtenons La clé est la combinaison des équations 5.15 et 5.7 (pour la capacité d'un condensateur plan) : (i) Nous obtenons (réponse) SOLUTION c. Identifier la clé La clé est l'équation 5.3 : Résoudre le problème Nous obtenons, en insérant les valeurs, (iv) Résoudre le problème Nous obtenons (réponse) (réponse) SOLUTION b. Décortiquer le problème Valider la réponse La différence de potentiel maximale est liée à la rigidité diélectrique du diélectrique.
L'ordre de grandeur a du sens. Toutes les réponses sont des valeurs positives, comme il se doit. 5.3 L'énergie emmagasinée dans un condensateur Une utilité importante des condensateurs est de pouvoir emmagasiner de l'énergie. Lorsqu'on branche un condensateur à une pile, celle-ci effectue un travail pour déplacer des charges d'une armature à l'autre. Ce travail est emmagasiné sous forme d'énergie potentielle électrique. Un condensateur chargé pourra 172 CHAPITRE 05 — Les condensateurs convertir l'énergie potentielle en effectuant un travail sur un dispositif branché au condensateur. Défi animé 5.2 Comment l'énergie emmagasinée dans un condensateur varie-t-elle lorsqu'on y insère un diélectrique ? On veut calculer l'énergie emmagasinée dans un condensateur ayant une capacité C. Pour ce faire, on branche le condensateur, initialement sans charge, à une pile.
Au début, le condensateur n'a pas d'énergie (Ui = 0), car il n'y a pas de charge sur ses armatures. La pile effectue un travail en transférant des électrons, d'une armature à l'autre. Supposons qu'à un temps intermédiaire, la charge du condensateur est q et qu'il y a une différence de potentiel ΔV = q/C entre les armatures. La pile transfère ensuite une charge supplémentaire infinitésimale dq entre les deux armatures. Cela augmente l'énergie potentielle de la charge et de l'énergie (voir l'équation 4.9 de la page 125, la variation d'énergie potentielle dU se calcule à partir de la charge et de la différence de potentiel : On obtient l'énergie potentielle du condensateur complètement chargé en additionnant toutes les dU (donc en intégrant), lorsque la charge sur le condensateur varie de q = 0 à q = Q : Il est possible d'exprimer l'énergie du condensateur en fonction de ΔVC en utilisant la définition de la capacité C = Q/(ΔVC) aux bornes du condensateur lorsque celui-ci est complètement chargé. On obtient les équations équivalentes suivantes : (5.16) Énergie d'un condensateur Remarquez que chaque expression est valable, peu importe la façon dont la charge a été accumulée sur le condensateur. EXEMPLE 5.2 Un défibrillateur cardiaque Un défibrillateur cardiaque est un appareil qui applique un choc électrique au cœur d'un patient qui bat de façon irrégulière. Un défibrillateur a un condensateur de 75 μF qui est chargé lentement, jusqu'à une différence de potentiel de 5,00 kV. a. Quelle est l'énergie emmagasinée dans le condensateur ? b. Si la quarte de cette énergie est transférée au patient en 2,0 ms, quelle est la puissance moyenne de l'impulsion électrique ? SOLUTION a. Décortiquer le problème Identifier la clé La clé est l'équation 5.16 : (i) 5.3 — L'énergie emmagasinée dans un condensateur 173 l'intervalle de temps nécessaire (voir l'équation 8.13 du tome 1) : Résoudre le problème Nous obtenons (ii) (réponse) SOLUTION b. Décortiquer le problème Résoudre le problème La puissance moyenne est (réponse) Valider la réponse Identifier la clé La clé est l'équation de la définition de la puissance moyenne, qui est le rapport de l'énergie transformée à la puissance est une grandeur physique.
Le condensateur se charge lentement, mais il peut se décharger très rapidement, ce qui donne une très grande puissance. Le champ électrique Un condensateur chargé possède une certaine quantité d'énergie ΔUC qui peut être utilisée pour faire fonctionner un appareil. On peut se demander où se trouve exactement cette énergie. Pour comprendre ce phénomène, prenons un condensateur plan composé d'armatures conductrices séparées par du vide. Selon l'équation 5.6, la différence de potentiel est ΔVC = Ed. De plus, selon l'équation 5.7, la capacité du condensateur plan est C = ε0A/d. L'insertion de ces deux équations dans l'équation 5.16 permet d'exprimer l'énergie du condensateur en fonction du module du champ électrique : (5.17) On remarque que le facteur Ad représente le volume entre les armatures. (voir la figure 5.8) est la densité d'énergie (l'énergie par unité de volume) de la région où il y a un champ électrique. On définit la densité d'énergie électrique u comme l'énergie du champ électrique par unité de volume : (5.18) Dans le système international, la densité d'énergie se mesure en J/m3 et elle dépend du carré du module du champ électrique. On a obtenu la relation de l'équation 5.18 peut être démontrée de façon générale. Le champ électrique, c'est-à-dire que dans un endroit où il y a un champ électrique , il y a une certaine densité d'énergie qui peut être utilisée pour accélérer des particules. Ceci montre bien que le champ électrique est réel et non un artifice de calcul. Nous reparlerons de la densité d'énergie électrique dans le tome 3, lorsque nous étudierons l'énergie transportée par la lumière. Nous verrons alors que la lumière, composée d'un champ électrique et d'un champ magnétique, transporte de l'énergie lumineuse est, en fait, l'énergie transportée par un champ électrique et un champ magnétique. 5.3 — L'énergie emmagasinée dans un condensateur 174 CHAPITRE 05 — Les condensateurs TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 5.2 On branche un condensateur plan à une pile. Les armatures sont séparées par du vide. Indiquez si l'énergie emmagasinée augmente, diminue ou reste la même lorsque :
la distance entre les armatures augmente ; b. on insère un diélectrique dont la constante diélectrique est κ = 2. Si on débranche la pile, indiquez si l'énergie emmagasinée dans le condensateur augmente, diminue ou reste la même lorsque : c. la distance entre les armatures augmente ; d. on insère un diélectrique dont la constante diélectrique est κ = 2.
5.4 TABLEAU 5.2 Les symboles utilisés dans les circuits Élément Symbole Pile Condensateur Fil L'association de condensateurs Les circuits électriques peuvent comprendre plusieurs condensateurs. Pour connaître la charge et l'énergie emmagasinée par chaque condensateur en particulier, il faut simplifier le circuit. Dans cette section, nous présentons une méthode qui permet de remplacer un circuit ou une partie d'un circuit par un condensateur équivalent, plus simple à analyser.
Pour simplifier les schémas, des symboles standards sont utilisés pour représenter les différents éléments de circuit. Les condensateurs sont représentés par le symbole montrant deux plaques parallèles branchées à des fils. Le tableau 5.2 indique les symboles utilisés dans ce chapitre. Les condensateurs en parallèle Deux condensateurs sont branchés en parallèle lorsqu'ils sont branchés de façon équivalente à la figure 5.8. Les armatures supérieures sont reliées par un fil conducteur.
De même, les deux armatures inférieures sont reliées ensemble. Les deux armatures supérieures sont au même potentiel, car elles forment un même conducteur. De même, les armatures inférieures sont au même potentiel, car elles sont reliées par un fil conducteur. Ceci implique que la différence de potentiel entre les bornes des deux condensateurs est identique : Interrupteur (en parallèle) . (5.19) La pile effectue un travail pour charger les deux condensateurs. À l'équilibre, la différence de potentiel entre les armatures des condensateurs est égale à celle de la pile (ΔVC = ΔVpile = E). Le condensateur C1 a alors une charge Q 1 = C1 ΔVC sur son armature positive et le condensateur C2 a une charge Q 2 = C2 ΔVC sur son armature positive.
La pile a donc déplacé une charge Q = Q 1 + Q 2 des armatures négatives vers les armatures positives. Les condensateurs en parallèle peuvent être remplacés par un seul condensateur équivalent Céq, comme le montre la figure 5.9. Ce condensateur a la même charge totale Q = Q 1 + Q 2 pour la même différence de potentiel ΔVC. On trouve la capacité équivalente : FIGURE 5.8 Deux condensateurs branchés en parallèle Capacité équivalente Si on a plusieurs condensateurs en parallèle, on peut les remplacer par un seul condensateur équivalent : (5.20) 5.4 — L'association de condensateurs FIGURE 5.9 (a) Les condensateurs sont branchés en parallèle. (b) Le circuit avec un condensateur équivalent. (5.21) L'ajout d'un condensateur en parallèle fait donc augmenter la capacité équivalente. En résumé, pour un groupement de condensateurs en parallèle : • Chaque condensateur a la même différence de potentiel : • La charge sur chaque condensateur est différente si les capacités sont différentes.
• Le condensateur qui a la plus grande capacité porte la plus grande charge. • L'ensemble peut être remplacé par un condensateur équivalent Céq = C1 + C 2 + · · · , et la même ΔVC est Q = Q 1 + Q 2 + · · · TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 5.3 Trois condensateurs C1 = 1 nF, C2 = 2 nF et C 3 = 3 nF sont branchés comme le montre le circuit ci-dessous. Classez les condensateurs selon un ordre croissant : a.
de la différence de potentiel ; b. de la charge portée. Les condensateurs en série Les condensateurs sont branchés en série lorsqu'ils sont l'un à la suite de l'autre, comme le montre la figure 5.10. L'armature inférieure de C1 est reliée à l'armature supérieure de C2 par un fil conducteur. Cette partie n'est pas reliée à la pile, ce qui implique que la pile ne peut pas ajouter des charges sur ces armatures. Si, initialement, les condensateurs ne sont pas chargés, alors la charge nette de cette région doit demeurer nulle. La pile effectue un travail pour déplacer des charges entre l'armature supérieure de C1 et l'armature inférieure de C2. Donc, l'armature supérieure de C1 acquiert une charge +Q et l'armature inférieure de C2, une charge −Q. Par induction électrique, la charge +Q va attirer une charge −Q sur l'armature inférieure de C1, laissant FIGURE 5.10 Deux condensateurs branchés en série 175 176 CHAPITRE 05 — Les condensateurs une charge +Q sur l'armature supérieure de C2. Comme le montre la figure 5.11a, la charge de chaque condensateur est la même : (5.22) Défi animé 5.3 Comment l'ajout de condensateurs modifie-t-il la charge portée par les condensateurs en série ? La différence de potentiel entre l'armature supérieure de C1 et l'armature inférieure de C2 est ΔV1 = Q/C1, et la différence de potentiel aux bornes de C2 est ΔV2 = Q/C2. La différence de potentiel entre l'armature supérieure de C1 et l'armature inférieure de C2 correspond à la différence de potentiel aux bornes de la pile, soit ΔVpile = ΔVC = ΔV1 + ΔV2. De nouveau, on peut remplacer les deux condensateurs par un seul condensateur équivalent, qui aura la même charge Q et la même différence de potentiel ΔVC = ΔV1 + ΔV2 à ses bornes (voir la figure 5.11). Étant donné que ΔV/Q = 1/Céq, on obtient Lorsque plusieurs condensateurs sont branchés en série, la capacité équivalente est obtenue en calculant l'inverse de l'addition des inverses des capacités : (5.22) Capacité équivalente Ceci implique que la capacité équivalente d'un groupe de condensateurs en série est plus faible que chacune des capacités individuelles des condensateurs.
En résumé, pour un groupement de condensateurs en série : • Chaque condensateur a la même charge Q . • La différence de potentiel aux bornes de chaque condensateur est ΔVi = Q/Ci. Le condensateur qui a la plus grande capacité porte la plus petite différence de potentiel. • L'ensemble peut être remplacé par un condensateur équivalent, avec la même charge Q et une différence de potentiel ΔVC = ΔV1 + ΔV2 + · · · FIGURE 5.11 (a) Les condensateurs sont branchés en série. (b) Le circuit avec un condensateur équivalent. 5.4 — L'association de condensateurs TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 5.4 Trois condensateurs C1 = 1 nF, C2 = 2 nF et C 3 = 3 nF sont branchés comme le montre le circuit ci-dessous. Classez les condensateurs selon un ordre croissant : a. de la différence de potentiel ; b. de la charge portée.
L'analyse de circuit de condensateurs Pour calculer la charge ou la différence de potentiel de chaque condensateur dans un circuit, on réduit graduellement le circuit à l'aide de la méthode de la capacité équivalente. La technique suivante peut être utilisée. TECHNIQUE 5.1 Les circuits de condensateurs 1. Identifier une partie du circuit comme un ensemble de condensateurs en parallèle ou en série (il n'y a pas toujours de condensateurs en série ou en parallèle). 2. Calculer la capacité équivalente de cet ensemble de condensateurs.
Redessiner le circuit avec le condensateur équivalent à cette partie de circuit. 3. Refaire les étapes précédentes jusqu'à ce qu'il ne reste qu'un seul condensateur équivalent branché à la source de f.é.m. est 4. Retourner en arrière pour remplacer les condensateurs équivalents par les condensateurs initiaux. • Pour des condensateurs en parallèle, ils ont la même ΔV et Qi = Ci ΔV.
• Pour des condensateurs en série, ils ont la même Q et ΔVi = Q/Ci. EXEMPLE 5.3 Un circuit de condensateurs Trois condensateurs (C1 = 4,0 nF, C2 = 3,0 nF et C 3 = 6,0 nF) sont branchés dans un circuit à une batterie (E = 12 V), comme le montre la figure ci-contre. a. Quelle est l'énergie emmagasinée dans le circuit ? b. Quelle est la charge et la différence de potentiel de chaque condensateur ? 177 178 CHAPITRE 05 — Les condensateurs Selon l'équation (i), l'énergie emmagasinée dans le circuit est SOLUTION a. Décortiquer le problème (réponse) Valider la réponse Identifier la clé Décortiquer le problème Résoudre le problème L'énergie emmagasinée dans tout le circuit, nous devons calculer la capacité équivalente du circuit. Ensuite, l'énergie dans un condensateur est donnée par l'équation 5.16 : SOLUTION b.
Identifier la clé Nous devons reconstruire le circuit original. Résoudre le problème (i) Résoudre le problème La capacité équivalente du circuit est (ii) En résumé, la charge et la différence de potentiel pour chaque condensateur sont (réponse) (réponse) Chaque condensateur C1 est équivalent pour le circuit. Sa différence de potentiel est égale à celle de la batterie, car et Valider la réponse Les condensateurs C2 et C3 sont en série ; nous devons avoir ΔV2 + ΔV3 = ΔV23 = 12 V. C'est bien ce que nous obtenons. De plus, C1 et C23 sont en parallèle ; nous devons avoir Q1 + Q23 = Q = 72 nC ; c'est aussi ce qui est obtenu. Remarquez qu'en a., nous avons exprimé la capacité en F pour obtenir U en joules alors qu'en b., nous avons gardé la charge en nC et la capacité en nF pour les calculs.
5.4 — L'association de condensateurs Les condensateurs déjà chargés Prenons deux condensateurs, ayant des capacités respectives C1 et C2, préalablement chargés à l'aide de piles. Le premier condensateur a une différence de potentiel ΔV1i et une charge Q 1i à l'armature positive (voir la figure 5.12a). Les condensateurs sont débranchés de leur pile respective et sont reliés ensemble. Lorsqu'on relie l'armature positive de C1 à l'armature positive de C2, les charges peuvent se redistribuer (voir la figure 5.12b), et il en va de même pour les armatures négatives, alors que les charges négatives sont reliées ensemble. Les charges sur les armatures de C1 et C2 (au signe +Q i et l'armature négative, une charge −Q 1i). De même, le second condensateur a une différence de potentiel initiale ΔV2i et une charge Q 2i. On les branche comme le montre la figure 5.12a, en incluant un interrupteur ouvert. Lorsqu'on ferme l'interrupteur, les charges se redistribuent jusqu'à ce que l'équilibre électrostatique soit atteint. Les armatures reliées par un fil conducteur se retrouvent au même potentiel, ce qui implique que les condensateurs ont la même différence de potentiel. Il est possible d'utiliser le méthode appliquée à la section 4.8 de la page 144. À l'équilibre, la différence de potentiel des condensateurs est la même. Les condensateurs se comportent comme s'ils étaient en parallèle, même s'il n'y a pas d'armature d'un condensateur vers une armature de l'autre condensateur. À la figure 5.12b, les armatures positives ont été reliées ensemble, et les armatures négatives ont aussi été reliées ensemble. Le principe de conservation de la charge implique : (armatures de même polarité) (ii) (5.24) (b) FIGURE 5.12 (a) Avant la fermeture de l'interrupteur, les condensateurs sont chargés. (b) Lorsqu'on ferme l'interrupteur, les charges se déplacent et une partie des charges positives sont neutralisées par la charge négative. À la figure 5.13a, il y a une page suivante, les condensateurs sont branchés avec les armatures de signes opposées reliées ensemble. Lorsqu'on ferme l'interrupteur, les charges se déplacent et une partie des charges positives sont neutralisées par la charge négative. À la figure 5.13a (voir la page suivante), la charge initiale du condensateur C1 est donc supérieure à la charge initiale du condensateur C2. Ceci a pour conséquence que, à l'équilibre, les armatures supérieures sont positives comme le montre la figure 5.13b (voir la page suivante). Le principe de conservation de la charge implique alors : (pour Q 1i > Q2i) (5.25) Dans le cas où Q 2i > Q 1i, ce sont les armatures inférieures qui seraient positives et les armatures supérieures qui seraient négatives. 179 180 CHAPITRE 05 — Les condensateurs (a) (b) FIGURE 5.13 Les condensateurs ont été chargés préalablement, avec Q 1i > Q 2i. (b) À l'équilibre, les armatures ont été reliées ensemble. EXEMPLE 5.4 Le branchement de deux condensateurs chargés Un condensateur C1 = 4,00 nF est chargé à l'aide d'une batterie de 8,00 V.
Un deuxième condensateur C2 = 3,00 nF est chargé à l'aide d'une batterie de 9,00 V.

On relie les armatures de polarités opposées. a. Calculez la charge sur l'armature positive de chaque condensateur. b. Calculez la différence de potentiel aux bornes de chaque condensateur. SOLUTION Décortiquer le problème Identifier la clé La première clé est l'équation 5.23, qui indique que la différence de potentiel des deux condensateurs est la même à l'équilibre : (i) Nous devons d'abord calculer la charge initiale sur chaque condensateur : Illustrer la situation Nous présentons, à la figure 5.14, la situation initiale et la situation finale. Comme Q 2i > Q1i, les armatures du haut seront négatives à l'équilibre. La deuxième clé est le principe de conservation de la charge pour les armatures reliées ensemble. Comme Q 2i > Q1i, ce sont les armatures du bas qui seront positives à l'équilibre : FIGURE 5.14 Le schéma de la situation pour l'exemple 5.4 (réponse) 5.4 — L'association de condensateurs SOLUTION A. Résoudre le problème Les équations (i) et (iii) forment un système d'équations à deux inconnues. En remplaçant les valeurs connues (exprimées en nF et en nC), nous avons (iii) (iv) Nous insérons le résultat de l'équation (iv) dans l'équation (iii) pour obtenir Q 2f : (réponse) SOLUTION b. Résoudre le problème Nous obtenons simplement la différence de potentiel de chaque condensateur à partir de la charge : (réponse) 181 Valider la réponse Les charges finales sont plus faibles que les charges initiales, car nous avons branché les armatures de polarités opposées. Ainsi, une partie de la charge a été neutralisée. Les différences de potentiel sur chaque condensateur sont égales à l'équilibre, comme il se doit. 182 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES RÉSUMÉ Dans ce chapitre, nous avons étudié le condensateur, un dispositif utilisé dans les circuits électriques pour emmagasiner des charges et de l'énergie.
LES DÉFINITIONS Un condensateur est composé de deux conducteurs (les armatures), portant des charges +Q et −Q respectivement, séparés par un diélectrique (un isolant). La différence de potentiel entre les armatures est ΔVC = V+ − V−. LES LOIS ET LES PRINCIPES L'énergie électrique est emmagasinée dans le champ électrique.
La densité d'énergie est Dans un condensateur chargé, l'énergie potentielle électrique est La capacité, mesurée en farads (F), est une propriété du condensateur : LES RÉSULTATS • Les condensateurs en parallèle : • Un condensateur plan est composé d'armatures planes, d'aire A et séparées d'une distance d.
• Un condensateur cylindrique est composé d'un cylindre, de longueur L et de rayon a, entouré d'un cylindre de rayon b. • Un condensateur sphérique est composé d'une sphère de rayon a à l'intérieur d'une sphère de rayon b. • L'ajout d'un diélectrique fait augmenter la capacité : où κ est la constante diélectrique. • Les condensateurs déjà chargés : Si le condensateur n'est plus relié à une pile lorsqu'on insère le diélectrique, la charge ne change pas, mais la charge du système est conservée. Si le condensateur est relié à une pile lorsqu'on insère le diélectrique, la charge sur chaque armature change : QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 183 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Q Questions simples • E Exercices simples • P problèmes • solution disponible Section 5.1 La capacité d'un condensateur Q1 Les armatures d'un condensateur sont reliées à une pile. a. Que devient la charge sur les armatures si on débranche la pile ? b. Que devient la charge si on relie les deux armatures avec un fil conducteur ? FIGURE 5.15 • Question 6 Q2 Qu'arrive-t-il à la capacité d'un condensateur lorsqu'on double : Condensateur Aire Distance C2 2A d 1 C3 A 2d 1 C4 2A 2d 2 a. la charge sur le condensateur ; E3 Un condensateur de 8,20 μF est branché à une pile de 9,00 V. Quelle est la charge sur l'armature positive du condensateur à l'équilibre ? P4 Une cellule biologique possède une membrane dont l'épaisseur est de 7,5 nm. La membrane est soumise de façon constante à une différence de potentiel de −90,0 mV (il y a un excédent de charges négatives à l'intérieur de la cellule).
La capacité de la membrane est de 6,0 nF. À la suite d'une perturbation, la différence de potentiel passe de −90,0 mV à 40,0 mV en 1,0 ms. E7 Un condensateur plan a une charge de 0,96 μC, et il a. Quelle est la charge nette initiale à l'intérieur de la cellule ? b. Selon le tableau 5.1, quel est le matériau utilisé comme diélectrique dans ce condensateur ?
b. Quelle est la charge nette finale à l'intérieur de la cellule ? c. Calculez le taux de variation moyen de la charge i = |(ΔQ)/(Δt)| traversant la membrane. (Nous verrons au chapitre 6 que cette quantité représente le courant électrique.) Section 5.2 Le calcul de la capacité Q5 Un condensateur plan est constitué d'armatures sépa- rées de vide.
Qu'arrive-t-il à la capacité du condensateur lorsqu'on : a. double l'aire de ses armatures ; des armatures parallèles dont l'aire est de 112 cm2 chacune.
Le module du champ électrique ré sultant entre les armatures est de 1,3 × 106 V/m. a. Quelle est la constante diélectrique de ce matériau ? E8 Un condensateur plan est constitué de deux armatures circulaires de 15,0 cm de rayon et séparées d'une distance de 5,0 mm. L'espace entre les armatures est rempli d'air. Quelle est la charge sur l'armature positive si on applique une différence de potentiel de 120,0 V ? E9 Un condensateur cylindrique possède un rayon externe a. divise par 2 la distance entre les armatures ; de 15,0 mm, un rayon interne de 6,00 mm et une longueur de 45,0 cm. Les deux armatures sont séparées par du polystyrène. Quelle est la capacité du condensateur ? b.
divise par 2 l'aire de ses armatures ; P10 Un condensateur sphérique est composé d'une sphère c. insère entre ses armatures un diélectrique dont la constante diélectrique est de 2,5 ? Q6 La figure 5.15 montre la charge en fonction de la diffé- rence de potentiel pour des condensateurs plans. Le tableau suivant donne les caractéristiques de quatre condensateurs.
Associez les courbes du graphique aux condensateurs énumérés dans le tableau.
creuse conductrice de rayon b et d'une sphère conductrice de rayon a au centre de la sphère creuse. Un diélectrique de constante κ remplit l'espace entre les deux conducteurs. Démontrez que la capacité de ce condensateur est donnée par l'expression : 184 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Section 5.3 L'énergie emmagasinée dans un condensateur P18 Un appareil photo utilise une pile de 3,00 V pour Q11 Un condensateur C1 a une capacité trois fois plus chargé un condensateur. Ce dernier est ensuite branché à un flash pour produire de la lumière.
Le condensateur se décharge en 18,0 μs avec une puissance moyenne de 12,5 W.
petite qu'un condensateur C 2. Le condensateur C1 a trois fois plus d'énergie que le condensateur C2. a. Quel est le rapport Q 1 /Q 2 ? b. Quel est le rapport (ΔV1)/(ΔV2) ?
Q12 Classez par ordre croissant d'énergie électrique les situations suivantes : (i) un condensateur de 2 μF branché à une pile de 2 V ; (ii) un condensateur de 2 μF possédant une charge de 2 μC ; (iii) un condensateur branché à une pile de 2 V et possédant une charge de 2 μC. E13 Un condensateur plan comporte deux armatures parallèles dont l'aire est de 53,0 cm2 chacune, séparées de 4,00 mm. Il y a une différence de potentiel de 720 V entre ses armatures. Déterminez : a. la capacité du condensateur ; b. la charge du condensateur ; c. l'énergie emmagasinée dans le condensateur. E14 Un condensateur plan a des armatures dont l'aire est de 26 cm2 et qui sont séparées d'une distance de 3,0 mm. Le condensateur est branché à une pile de 9,0 V.
Quelle est la densité d'énergie électrique présente entre ses armatures ? P15 Lorsqu'on branche un condensateur plan à une source de f.é.m. de 34,0 V, une densité d'énergie de 2,55 × 10−3 J/m3 apparaît entre ses armatures.
L'aire de chaque armature est de 16,0 cm2.
Quelle est la capacité du condensateur ? a. Quelle est la charge sur le condensateur lorsque celui-ci est complètement chargé ? b. Quelle est la capacité du condensateur ? c. Quel est le taux de variation moyen de la charge i = |(ΔQ)/(Δt)| ? (Nous verrons au chapitre 6 que ce taux de variation représente le courant électrique.) P19 Un condensateur plan est composé d'armatures, dont l'aire est de 0,500 m2 chacune, séparées d'une distance de 95,0 μm ; l'espace est rempli d'air. On charge le condensateur en le branchant à une source de f.é.m. de 200 V. Une fois chargé, on le débranche de la source de f.é.m., sans décharger le condensateur. Calculez le travail pour séparer les armatures jusqu'à une distance de 300 μm. P20 Un condensateur plan est composé d'armatures, dont l'aire est de 0,250 m2, séparées d'un diélectrique ayant une épaisseur de 600 μm et dont la constante diélectrique est de 6,00. On charge le condensateur en le branchant à une source de f.é.m. de 120 V, puis on débranche la source de f.é.m. Quel est le travail nécessaire pour enlever le diélectrique ? Section 5.4 L'association de condensateurs Q21 Trois condensateurs ont des capacités C, 2C et C2 respectivement. On les branche de trois façons différentes, comme il est indiqué à la figure 5.16. Classez les situations par ordre croissant de C éq. P16 Un condensateur plan est conçu pour être soumis à une différence de potentiel maximale de 400 V et emmagasiner une énergie électrique maximale de 80,0 mJ. Il utilise un diélectrique dont la rigidité diélectrique est de 150 × 106 V/m, et la constante diélectrique est de 4,70. Déterminez : a. la capacité du condensateur ; b. la distance entre les armatures ; c. l'aire d'une armature ; (i) (ii) (iii) FIGURE 5.16 • Question 21 E22 On branche en parallèle un condensateur C1 = 6,00 μF et un condensateur C 2 = 4,00 μF. On applique une différence de potentiel de 200 V à cette association. Déterminez : d. la charge du condensateur si l'énergie emmagasinée est de 50,0 mJ. a. la capacité équivalente ; P17 Un condensateur de 65 μF est chargé en le branchant c. la différence de potentiel aux bornes de chaque condensateur. à une source de f.é.m. de 120 V. Il est ensuite débranché de la source et branché à un moteur d'une voiture miniature de 250 g.
Le rendement du moteur est de 35 %, c'est-à-dire que 35 % de l'énergie électrique est transformée en énergie cinétique. a. Quelle est l'énergie cinétique de la voiture lorsque le condensateur est complètement déchargé ?
b. Quel est le module de la vitesse finale de la voiture ? b. la charge de chaque condensateur ; E23 On branche en série un condensateur C1 = 6,00 μF et un condensateur C 2 = 4,00 μF. On applique une différence de potentiel de 200 V à cette association. Déterminez : a. la capacité équivalente ; b. la charge de chaque condensateur ; c. la différence de potentiel aux bornes de chaque condensateur. QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES E24 Déterminez la capacité équivalente de l'associa- Déterminez : tion des condensateurs de la figure 5.17 si C1 = 12,0 μF, C 2 = 15,0 μF et C 3 = 23,0 μF. a. la capacité équivalente du circuit ; 185 b. la charge sur chaque condensateur ; c.
la différence de potentiel aux bornes de chaque condensateur ; d.
l'énergie emmagasinée dans chaque condensateur. FIGURE 5.17 • Exercice 24 E25 Combien de condensateurs de 2,0 μF doit-on bran- cher en parallèle pour accumuler une charge de 450 μC, si la différence de potentiel aux bornes des condensateurs est de 37,5 V ? E26 La capacité équivalente du circuit de la figure 5.18 est Céq = 12,25 μF.
Déterminez la capacité du condensateur C1. FIGURE 5.20 • Problème 30 P31 Pour le circuit de la figure 5.21, les capacités des conden- sateurs sont C1 = 12,0 μF, C2 = 6,00 μF et C3 = 8,00 μF. Les condensateurs sont branchés à une source de f.é.m. E = 120 V. a. Quelle est la capacité équivalente du circuit ? b. Quelle est l'énergie électrique emmagasinée dans le circuit complet ? c. Calculez la charge de chaque condensateur. d.
Quelle est la différence de potentiel aux bornes de chaque condensateur ? FIGURE 5.18 • Exercice 26 e. Calculez l'énergie emmagasinée sur chaque condensateur. E27 On place deux condensateurs en parallèle, C1 = 3,0 μF et C2 = 5,0 μF.
On les branche à une source de f.é.m. de 180 V. Calculez l'énergie électrique emmagasinée dans le circuit. E28 On place deux condensateurs en série, C 1 = 3,0 μF et C 2 = 5,0 μF. On les branche à une source de f.é.m. de 180 V. Calculez l'énergie électrique emmagasinée dans le circuit. E29 La figure 5.19 montre deux condensateurs en série ayant une aire A. La partie centrale est mobile.
Montrez que la capacité équivalente est indépendante de la position centrale et qu'elle est donnée par l'expression : FIGURE 5.21 • Problème 31 P32 Dans le circuit de la figure 5.22, les condensateurs ont les capacités suivantes : C1 = 3,00 μF, C 2 = 5,00 μF, C 3 = 4,00 μF, C 4 = 2,00 μF et C 5 = 3,00 μF. a. Quelle est la capacité équivalente entre les points a et b ? b. Si la charge sur C 2 est de 120 μC, quelle est la différence de potentiel aux bornes du condensateur C 5 ? FIGURE 5.19 • Exercice 29 P30 Soit le circuit illustré à la figure 5.20, avec C1 = 3,00 μF, C2 = 5,00 μF et C3 = 6,00 μF, branché à une pile E = 10,0 V. FIGURE 5.22 • Problème 32 186 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES P33 Dans le circuit de la figure 5.23, la pile a une f.é.m. de P37 Un condensateur plan a des armatures de 25 m2 d'aire 9,00 V et les condensateurs sont C1 = 2,00 μF, C2 = 4,00 μF, C 3 = 3,00 μF et C 4 = 5,00 μF. Le circuit possède aussi un interrupteur qui peut être ouvert ou fermé. Déterminez la charge sur chaque condensateur : chacune qui sont séparées d'une distance de 10,0 mm. On place entre les armatures une feuille de mica, dont la constante diélectrique est de 4,0 et qui a une épaisseur de 3,0 mm. a. lorsque l'interrupteur est ouvert ; a. Calculez la capacité du condensateur si le mica se trouve au milieu du condensateur. b. lorsque l'interrupteur est fermé. b.
Calculez la capacité du condensateur si le mica se trouve collé sur une des armatures du condensateur. P38 Quelle est la capacité du condensateur de la figure 5.25, qui a des armatures d'aire A qui sont séparées d'une distance d, avec trois diélectriques entre les armatures, sachant que les diélectriques 2 et 3 ont chacun une épaisseur de d/2 ?
FIGURE 5.23 • Problème 33 P34 Deux condensateurs C1 = 5,0 μF et C 2 = 8,0 μF sont branchés en série avec une pile de 12,0 V. a. Trouvez la charge sur chaque condensateur et la différence de potentiel aux bornes de chaque condensateur. b. On débranche la pile et on relie les armatures de même polarité ensemble. Trouvez la nouvelle charge sur chaque condensateur ainsi que la nouvelle différence de potentiel aux bornes de chaque condensateur. P35 Deux condensateurs C1 = 1,50 μF et C 2 = 5,60 μF sont tous les deux chargés avec une pile de 60,0 V. Une fois chargés, on branche les deux condensateurs de sorte que leurs armatures de polarités opposées soient reliées. a. Déterminez la différence de potentiel aux bornes de chaque condensateur à l'équilibre. b. Déterminez la charge sur chaque condensateur à l'équilibre. P36 Les armatures d'un condensateur ont une aire A et sont séparées d'une distance d. On place entre les armatures deux diélectriques différents, de deux façons distinctes, comme le montre la figure 5.24. a. Quelle est la capacité équivalente dans la situation illustrée à la figure 5.24a ? b. Quelle est la capacité équivalente dans la situation illustrée à la figure 5.24b ? FIGURE 5.25 • Problème 38 P39 Un condensateur variable, utilisé dans les syn- toniseurs analogiques de radios ou de télévisions, est illustré à la figure 5.26. Il est composé d'un groupe d'armatures fixes ayant la forme de demi-cercles, et d'un groupe d'armatures pouvant tourner, ayant la même forme et la même aire. Les ar matures fixes sont reliées ensemble par une tige métallique. De même, les armatures mobiles sont reliées par une autre tige métallique, de sorte que la polarité des armatures alterne d'une armature à l'autre. Le nombre d'armatures est N, chacune a une aire A et est séparée de l'armature de polarité opposée par une distance d ; l'espace entre les deux est rempli d'air. a. Quelle est la capacité du condensateur lorsque les armatures mobiles sont tournées d'un angle θ (mesuré en degrés) par rapport aux armatures fixes ? b. Quelle est la capacité maximale du condensateur ? (Indice : Le condensateur peut être considéré comme une association de condensateurs.) (a) FIGURE 5.24 • Problème 36 (b) FIGURE 5.26 • Problème 39 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 187 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 5.1 a.
ΔV1 /ΔV2 = 2 Une fois que le condensateur est chargé, la différence de potentiel d'un condensateur est égale à celle de la pile. b.
Q 1 /Q2 = 2 La charge d'un condensateur est proportionnelle à la différence de potentiel. c. C1 /C2 = 1 La capacité ne dépend ni de la charge ni de la différence de potentiel, mais des propriétés géométriques. Comme les condensateurs sont identiques, ils ont la même capacité. 5.2 a. U diminue. La différence de potentiel du condensateur, ΔVC = E, ne change pas à cause de la pile. L'énergie est U = C (ΔVC)2 /2, où C = 0A/d pour un condensateur plan. Si d augmente, la capacité diminue et U diminue aussi. b. U augmente. Avec l'ajout du diélectrique, la capacité augmente, donc U augmente aussi. c. U augmente. Le condensateur n'est pas branché, alors la charge Q ne change pas. L'énergie est U = Q 2 /(2C). Si d augmente, C diminue, ce qui fait augmenter U. d.
U diminue. L'ajout du diélectrique fait augmenter C, donc U diminue, car U = Q 2 /(2C), et Q ne change pas. 5.3 a. ΔV1 = ΔV2 = ΔV3 b. Q 1 < Q 2 < Q 3 5.4 a. ΔV3 < ΔV2 < ΔV1 b. Q 1 = Q 2 = Q 3 Pour des condensateurs branchés en parallèle, la différence de potentiel est la même. La charge est Q = C ΔV . Le condensateur qui a le moins de charge est celui qui a la plus petite capacité, car ΔV est la même pour des condensateurs branchés en parallèle. Pour des condensateurs branchés en série, le condensateur qui a la plus petite différence de potentiel est celui avec la plus grande capacité, car ΔV = Q/C, et la charge est la même pour tous les condensateurs en série. Pour des condensateurs branchés en série, la charge est la même. Chapitre 188 Le courant électrique Buts du chapitre Ce chapitre porte sur le mouvement des charges à l'intérieur des conducteurs, c'est-à-dire le courant électrique. Après l'étude de ce chapitre, vous serez en mesure : • de définir le courant électrique ; • de développer un modèle microscopique du courant électrique ; • de calculer la résistance d'un dispositif ; • de calculer la puissance électrique d'un dispositif. Préalables Ce chapitre porte sur l'utilisation du concept d'énergie électrique et les propriétés des conducteurs. Revoyez : • les propriétés des conducteurs, étudiées aux sections 1.3 et 3.5 ; • les sources de potentiel électrique, décrites à la section 4.9 ; • l'énergie potentielle électrique, présentée à la section 4.1 ; • les condensateurs, étudiés à la section 5.1. 189 Un courant électrique circule dans un filament de tungstène, ce qui produit de la lumière. 190 CHAPITRE 06 — Le courant électrique La vie moderne est basée sur l'utilisation de l'énergie électrique pour faire fonctionner un grand nombre d'appareils.
Les appareils de chauffage, les appareils ménagers et les appareils électroniques fonctionnent grâce au mouvement de charges électriques, qu'on appelle courant électrique. Le mouvement de charges électriques est aussi très important pour les scientifiques. En biologie, le système nerveux d'un organisme correspond à des circuits électriques dans lesquels circulent des charges. Les ingénieurs électriciens conçoivent et installent un grand nombre de systèmes électriques, qui vont des réseaux de distribution électrique jusqu'aux systèmes de stockage de l'information. De même, les astronomes étudient le mouvement de charges qui viennent du Soleil et qui peuvent endommager les satellites et même les installations électriques à la surface de la Terre. Dans les premiers chapitres de ce tome, nous avons étudié l'électrostatique, c'est-à-dire les charges électriques immobiles. Nous commençons maintenant l'étude des charges en mouvement. Par exemple, lorsqu'on branche une ampoule à une pile au moyen de fils conducteurs, le courant circule dans les fils et l'ampoule éclaire, comme le montre la photo au début du chapitre. Nous avons appris dans les chapitres précédents que les charges subissent une force électrique lorsqu'elles sont dans un champ électrique. Nous allons donc étudier de quelle façon un champ est produit dans un conducteur pour faire déplacer les charges. Au niveau macroscopique, on obtient un courant dans un circuit lorsqu'on utilise une source de f.é.m., comme une pile, pour produire une différence de potentiel.
Les matériaux et les différents dispositifs réagissent différemment lorsqu'une différence de potentiel est appliquée. Pour certains dispositifs, le courant est important ; pour d'autres, le courant est faible. Nous allons définir le concept de résistance pour caractériser ces dispositifs.
Lorsqu'on branche un appareil à une source de f.é.m., ce dernier transforme l'énergie électrique en une autre forme. Nous verrons comment calculer la puissance associée à une transformation d'énergie en fonction de la différence de potentiel appliquée et du courant qui circule dans l'appareil. 6.1 Le courant électrique Pour étudier le courant électrique, on commence avec un condensateur chargé, comme le montre la figure 6.1a. On peut vérifier que des charges sont présentes sur chaque armature en approchant des isolants chargés comme dans les expériences de la section 1.1. Si on relie les deux armatures à l'aide d'un fil conducteur, le condensateur se décharge rapidement. Les charges se déplacent d'une armature à l'autre : un courant électrique est produit. (a) (b) FIGURE 6.1 (a) Un condensateur chargé.
(b) Lorsqu'on relie les armatures, un courant est produit. 6.1 — Le courant électrique Comment fait-on pour savoir qu'il y a eu un courant électrique dans le conducteur ?
Plusieurs signes permettent de répondre à cette question : le fil conducteur peut devenir chaud, ce qui indique qu'une partie de l'énergie électrique s'est transformée en énergie thermique. Si on branche une ampoule, qui comprend un mince filament de tungstène (un conducteur), comme le montre la figure 6.1b, celle-ci émet de la lumière. En effet, lorsque le courant circule dans le filament, le tungstène devient suffisamment chaud pour émettre de la lumière visible. Une partie de l'énergie électrique s'est transformée en énergie lumineuse. Il existe aussi des appareils, appelés ampèremètres et symbolisés dans les circuits par , qui permettent de mesurer le courant électrique. Les porteurs de charge Le condensateur de la figure 6.1 se décharge parce que les charges négatives sont attirées par les charges positives, et les deux types de charges se neutralisent lorsqu'elles se rencontrent. Au chapitre 1, on a indiqué que ce sont les électrons qui se déplacent dans les conducteurs et que les ions positifs sont fermement liés. Donc, si on relie les deux armatures du condensateur à l'aide d'un conducteur, des électrons se déplacent. Ce mouvement d'électrons représente le courant électrique. Dans certaines situations, un courant électrique peut être le résultat d'un mouvement de charges positives et de charges négatives. C'est le cas par exemple dans une solution aqueuse, où les ions positifs et les ions négatifs sont libres de se déplacer. On appelle porteurs de charge les particules qui sont responsables de la conduction. Dans les conducteurs, les porteurs de charge sont des électrons. Dans le cas de la solution aqueuse, les porteurs de charge sont les ions positifs et les ions négatifs. Le courant i (aussi appelé l'intensité du courant) représente la charge nette qui traverse une surface par unité de temps : (6.1) Dans le système international, le courant se mesure en ampères (A), en l'honneur du physicien français André-Marie Ampère (1775-1836). Cette unité est l'une des unités de base du SI. Nous verrons la définition précise de cette unité au chapitre 9. Selon l'équation 6.1, le coulomb est relié à l'ampère : (6.2) Étant donné qu'un coulomb représente une charge importante, un courant d'un ampère représente un courant assez important. Dans les circuits, on utilise couramment le milliampère (1 mA = 1 × 10−3 A) et le microampère (1 μA = 1 × 10−6 A). On donne aussi un sens au courant, selon le sens du mouvement des porteurs de charge. Le sens du courant électrique correspond au sens du déplacement des porteurs de charge positive ou au sens opposé du mouvement des porteurs de charge négative. On indique le sens du courant par une flèche. Dans la figure 6.2 (voir la page suivante), si on suppose que les charges sont des protons ou des électrons, il y a trois charges positives qui se déplacent vers la droite (Q+ = +3e) et une charge négative qui se déplace vers la gauche (Q− = −e). La charge nette qui traverse la surface est Qnet = 3e−(−e) = 4e, et le courant est vers la droite.
Sens du courant 191 192 CHAPITRE 06 — Le courant électrique L'équation 6.1 montre qu'un courant est le résultat d'un déplacement d'une charge nette. Lorsque de l'eau circule dans un tuyau, un grand nombre de protons et d'électrons se déplacent. Le courant électrique est quand même nul, car il y a autant de protons que d'électrons. De même, dans un conducteur isolé, les électrons de conduction se déplacent à grande vitesse dans tous les sens à cause de l'agitation thermique. Il y a autant d'électrons qui se déplacent vers la gauche qu'd'électrons qui se déplacent vers la droite. Le courant est nul. FIGURE 6.2 Le déplacement des charges correspond à un courant à travers la surface.
Lorsque le courant varie dans le temps, on doit prendre la limite Δt → 0 dans l'équation 6.1 pour trouver la valeur instantanée du courant. On obtient la définition générale du courant électrique à l'aide de la dérivée : (6.3) Courant électrique FIGURE 6.3 Le courant électrique est conservé à un nœud. Il est tentant d'écrire le courant comme un vecteur, car il est caractérisé par une valeur positive et une orientation. Cependant, le courant n'obéit pas à l'algèbre vectorielle, comme le montre la figure 6.3. Dans cette figure, un conducteur se divise en deux conducteurs. Le point de jonction est appelé un nœud. Les charges provenant du conducteur de gauche et qui arrivent au nœud peuvent continuer soit dans le conducteur du haut, soit dans le conducteur du bas (elles ne peuvent pas s'accumuler au nœud). Puisque le courant électrique correspond au nombre de charges qui passent vis-à-vis d'un point, le courant doit être conservé parce que la charge est conservée : (6.4) L'addition des courants est une simple somme algébrique.
L'addition de vecteurs donnerait un résultat différent. L'équation 6.4 est un exemple de la loi des nœuds : Loi des nœuds La somme algébrique des courants qui arrivent à un nœud est égale à la somme algébrique des courants qui quittent ce nœud. Cette loi sera très utile au chapitre 7 dans l'analyse de circuits complexes. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 6.1 La figure suivante présente les courants dans des conducteurs. Indiquez la valeur et le sens du courant i dans le conducteur vertical. La vitesse de dérive Les électrons de conduction se comportent comme les atomes d'un gaz. Ils se déplacent de façon désordonnée, à une très grande vitesse. Le mouvement résultant est nul, car autant d'électrons se déplacent vers la gauche que d'électrons vers la droite. Lorsqu'un courant circule dans un conducteur, il y a un 6.1 — Le courant électrique mouvement ordonné des électrons, qui se déplacent tous à une vitesse vitesse de dérive, en plus du mouvement désordonné. , la figure 6.4 montre une section d'un fil conducteur dont l'aire transversale est A. Dans la figure, on a illustré uniquement la vitesse de dérive . Ce mouvement engendre un courant en sens opposé à la vitesse de dérive, car les électrons ont une charge négative. Durant un temps Δt, les électrons se déplacent d'une distance Pour obtenir la charge qui traverse une section transversale du fil, on doit compter le nombre d'électrons dans un volume Si n représente le nombre d'électrons de conduction par unité de volume, alors il ya électrons dans la longueur . En multipliant par la charge de chaque électron (q = −e), on obtient la charge négative qui traverse une section du fil en un temps Δt : FIGURE 6.4 Dans un conducteur, des électrons se déplacent d'une distance durant un intervalle de temps Δt. Le courant est opposé à . Le courant est donc (6.5) et le sens du courant est opposé au sens de la vitesse 193 . Le nombre d'électrons de conduction par unité de volume (n) est aussi appelé la densité de porteurs de charge. La valeur de n est une propriété du conducteur. Nous verrons au chapitre 9 la façon de mesurer ce paramètre. Pour l'instant, on peut poser l'hypothèse que les conducteurs ont un électron de conduc tion par atome. La densité de porteurs de charge est alors égale au nombre d'atomes par unité de volume, qui peut être calculé à partir de la masse volumique et de la masse molaire du matériau (voir l'annexe F pour obtenir les valeurs). En effet, (6.6) où NA = 6,022 × 1023 mol−1 est le nombre d'Avogadro, ρm est la masse volumique du conducteur et M, sa masse molaire. Dans l'équation 6.5, A est une propriété du fil, n est une propriété du matériau et e, une propriété des porteurs de charge. Pour un fil donné, seul le module de la vitesse de dérive peut être modifié pour changer le courant dans le fil. Nous verrons dans la prochaine section que la vitesse de dérive dépend directement du champ électrique présent dans le conducteur. On définit la densité de courant J comme le courant par unité d'aire : (6.7) Dans le SI, la densité de courant se mesure en A/m2. Selon l'équation 6.5, la densité de courant dans un fil est (6.8) Module de la densité de courant 194 CHAPITRE 06 — Le courant électrique L'équation 6.8 montre que la densité de courant est une fonction des propriétés du conducteur (par la densité de porteurs de charge) et de la vitesse de dérive. De plus, la densité de courant est une fonction locale qui peut être définie pour chaque point du conducteur. Il est alors possible de définir le vecteur densité de courant , qui est proportionnel à la vitesse de dérive. De façon générale, pour des porteurs de charge dont la charge est q, la densité de courant est (6.9) Pour les conducteurs, la charge des porteurs de charge (les électrons) est q = −e, et la densité de courant est opposée à la vitesse de dérive. FIGURE 6.5 Le calcul du courant qui traverse une surface L'équation 6.7 est valable pour une densité de courant uniforme et une surface perpendiculaire à la vitesse des porteurs de charge. Dans certaines situations, les porteurs de charge ne sont pas distribués uniformément dans le conducteur. Ceci produit une densité de courant non uniforme, qui varie en fonction de la position dans le conducteur. Pour calculer le courant qui traverse une surface quelconque (pas nécessairement perpendiculaire au déplacement des porteurs de charge), on doit diviser la surface en éléments de surface , perpendiculaires à la surface (voir la figure 6.5). Le courant correspond alors au flux de la densité de courant à travers la surface : (6.10) Si la surface est perpendiculaire à la densité de courant (donc à) et que celle-ci est uniforme, l'équation 6.10 implique que est parallèle ce qui est équivalent à l'équation 6.7. EXEMPLE 6.1 La vitesse de dérive dans le cuivre Un fil de cuivre a un diamètre de 2,59 mm. Il est parcouru par un courant de 500 mA. Quel est le module de la vitesse de dérive des électrons à l'intérieur du fil de cuivre ? SOLUTION Décortiquer le problème La masse volumique et la masse molaire du cuivre sont présentées à l'annexe F. Un fil est un cylindre ; l'aire transversale est A = πR 2 = πd2 /4, où d est le diamètre du fil. Nous exprimons toutes les données dans le SI. Identifier la clé La clé est l'équation 6.5 : (i) où n est la densité de porteurs de charge, donnée par l'équation 6.6 : (ii) Résoudre le problème Nous calculons d'abord n à l'aide de l'équation (ii) : (iii) 6.2 — Le champ électrique et la conduction Nous remplaçons ensuite ce résultat dans l'équation (i) : 195 Valider la réponse La réponse semble être très faible, mais elle représente bien la réalité. La vitesse de dérive des électrons dans un conducteur est très, très faible. (réponse) EXEMPLE 6.2 Un courant non uniformément distribué Un fil de 8,25 mm de diamètre est parcouru par un courant. La densité de courant est parallèle au fil, et elle est proportionnelle à la distance par rapport au centre du fil : J = 240 A/m3 r . Calculez le courant qui traverse ce fil. SOLUTION Illustrer la situation La figure 6.6 montre le fil et l'élément de surface selon une vue de côté et selon une vue de face. Comme la densité de courant dépend de la distance r par rapport au centre du fil, l'élément choisi est un petit anneau qui a un rayon r et une épaisseur dr. L'aire de l'anneau est dA = 2π r dr, car cela correspond à un cercle ayant une petite épaisseur dr. L'élément est parallèle à la densité de courant. Identifier la clé La clé est l'équation 6.10 : (i) Résoudre le problème Nous remplaçons J dans l'équation (i) et nous calculons l'intégrale : FIGURE 6.6 Le schéma de la situation pour l'exemple 6.2 Décortiquer le problème (réponse) Valider la réponse Nous obtenons les bonnes unités. 6.2 Le champ électrique et la conduction Le courant électrique dans les conducteurs est le résultat du mouvement cohérent des électrons. Durant leur déplacement, les électrons entrent en collision avec les atomes. Pour continuer de se déplacer, ils doivent subir une force, exercée par un champ électrique. Un champ électrique est nécessaire pour qu'un courant circule dans un conducteur.
Revenons à la situation décrite à la section 6.1, où les armatures d'un condensateur chargé sont reliées par des conducteurs. La figure 6.7 (voir la page suivante) montre le circuit avant que les branchements soient terminés.
Les charges se distribuent à la surface de chacun des conducteurs de telle sorte que le champ résultant est nul à l'intérieur. La distribution de charges à la surface de chacun des fils est uniforme, à l'exception des extrémités. 196 CHAPITRE 06 — Le courant électrique FIGURE 6.7 Les conducteurs ne sont pas reliés. Dans chaque conducteur, la charge est uniformément distribuée et le champ électrique est nul. Il n'y a pas de courant. Lorsqu'on relie les deux conducteurs, les électrons près de l'extrémité de du conducteur sont libres de neutraliser les ions positifs près de l'extrémité de l'autre conducteur. Après un intervalle de temps très court, les électrons du conducteur se sont déplacés très légèrement, de telle sorte que la charge n'est plus uniformément distribuée, comme le montre la figure 6.8. Il y a beaucoup de charges positives près de l'armature positive du condensateur, la charge diminue graduellement jusqu'à zéro près du centre et est de plus en plus négative en allant vers l'armature négative. La distribution de charges non uniforme à la surface des conducteurs produit un champ électrique de module uniforme et parallèle au conducteur à l'intérieur de celui-ci. C'est ce champ qui exerce une force sur les électrons de conduction et engendre le courant électrique à l'intérieur du conducteur. FIGURE 6.8 En reliant les conducteurs, la charge n'est plus uniformément distribuée, et il y a un champ électrique dans les conducteurs, qui engendre un courant entre l'armature positive et l'armature négative. Le champ électrique apparaît très rapidement à l'intérieur du conducteur et se propage à la vitesse de la lumière. Les électrons de conduction se mettent en mouvement simultanément (on néglige ici le temps pour que le champ électrique se propage). Ce phénomène se produit dans tout le circuit en même temps, de telle sorte qu'à un instant donné, le courant i est le même partout dans le circuit. Si ce n'était pas le cas, il y aurait une accumulation d'électrons à un point particulier, ce qui changerait le champ électrique de telle sorte que l'accumulation de charges disparaîtrait. Cela signifie aussi que le module du champ est uniforme à un instant donné dans le conducteur. Un modèle simple de la conduction Le mouvement des électrons de conduction est causé par le champ électrique à l'intérieur du conducteur. Le module du champ est uniforme dans tout le 6.2 — Le champ électrique et la conduction conducteur, et il exerce une force sur tous les électrons de conduction. Le résultat est un mouvement des électrons à une vitesse constante et un courant électrique i partout dans le conducteur. On peut obtenir une relation entre le champ appliqué et le courant dans un conducteur, en utilisant un modèle microscopique simple du mouvement des électrons. On suppose que les électrons de conduction se déplacent dans le conducteur et qu'ils entrent en collision avec les ions positifs du conducteur. En l'absence de champ électrique, un électron de conduction se déplace à une très grande vitesse de l'ordre de 105 m/s, à cause de l'agitation thermique (l'indice th veut dire « thermique »).
L'électron subit un très grand nombre de collisions chaque seconde. Après chacune d'elles, la vitesse de l'électron est orientée de façon aléatoire. On peut dire qu'à chaque collision, l'électron « oublie » sa vitesse avant la collision. Entre deux collisions, l'électron se déplace en ligne droite. Après un certain nombre de collisions, le déplacement de l'électron est nul, comme le montre la figure 6.9a. Si on calcule la vitesse moyenne de tous les électrons, on obtient un résultat nul. Il y a autant d'électrons qui se déplacent vers la gauche que vers la droite, et le courant électrique est nul. À la figure 6.9b, un champ électrique uniforme est orienté vers la gauche. Entre deux collisions, un électron subit une accélération vers la droite, selon la deuxième loi de Newton : (6.11) (a) (b) FIGURE 6.9 Dans un conducteur, l'électron subit un grand nombre de collisions. La trajectoire de l'électron entre deux collisions n'est plus une ligne droite mais une parabole. La vitesse après un temps t est (6.12) où est la vitesse aléatoire due à l'agitation thermique. On peut calculer la vitesse moyenne des électrons après un grand nombre de collisions en calculant la moyenne de l'équation 6.12 pour tous les électrons.
La moyenne de est nulle, comme c'est le cas lorsque le champ électrique est nul. Le deuxième terme est commun à tous les électrons. En effet, tous les électrons acquièrent une vitesse dans le sens opposé du champ électrique. Soit τ le temps 197 198 CHAPITRE 06 — Le courant électrique moyen entre deux collisions. Alors, la vitesse moyenne des électrons, qu'on appelle la vitesse de dérive, est (6.13) Le signe négatif indique que la vitesse de dérive est opposée au champ, car l'électron est une particule de charge négative. Dans l'exemple 6.1, nous avons obtenu une vitesse de dérive des électrons ayant un module de l'ordre de 10−6 m/s, ce qui est beaucoup plus faible que le module de la vitesse thermique (de l'ordre de 105 m/s). Le module de la vitesse d'un électron entre deux collisions est donc à peu près le même avec ou sans champ électrique.
Le temps moyen τ entre deux collisions n'est pas modifié lorsqu'il y a un champ électrique. Ceci implique que le temps moyen entre deux collisions ne dépend pas du champ électrique. L'équation 6.13 implique alors que la vitesse de dérive est proportionnelle au champ électrique, car les fac teurs e, τ et m ne changent pas lorsque le champ électrique change. On peut maintenant exprimer la densité de courant en fonction du champ électrique. Selon l'équation 6.9, et l'équation 6.13 peut s'écrire (6.14) où n est la densité de porteurs de charge, e est la charge élémentaire et m, la masse de l'électron. Selon le modèle simple de la conduction, la densité de courant est proportionnelle au champ électrique présent dans le conducteur.
À chaque collision, l'électron donne une partie de son énergie cinétique aux ions positifs, de façon désordonnée. L'énergie électrique emmagasinée dans le champ électrique se transforme en énergie thermique. Un conducteur parcouru par un courant électrique devient chaud.
La conductivité et la résistivité Dans le cas de conducteurs, l'expression entre parenthèses de l'équation 6.14 est une propriété du conducteur ; la densité de courant (et donc le courant) est proportionnelle au champ électrique : si le champ électrique double, la densité de courant double. La constante de proportionnalité est appelée la conducti vité σ du matériau. Selon le modèle simple de la conduction, (6.15) De façon générale, on définit la conductivité d'un matériau (qu'il soit conducteur ou non) comme le rapport entre le module de la densité de courant et le module du champ électrique : (6.16) Pour un champ électrique fixe, on obtient une plus grande densité de courant (et donc un courant plus intense) si la densité de porteurs de charge est grande et si le temps entre deux collisions est long. Dans le cas de bons conducteurs, 6.2 — Le champ électrique et la conduction la conductivité est grande alors que dans le cas de mauvais conducteurs, la conductivité est plus faible. Pour un isolant comme le verre, la densité de porteurs de charge est très, très faible (il y a très peu d'électrons de conduction), ce qui implique une conductivité très faible. De façon usuelle, on utilise plutôt la résistivité ρ du matériau, définie comme l'inverse de la conductivité : (6.17) Selon le modèle de la conduction, la résistivité est (6.18) Dans ce cas, les meilleurs conducteurs ont une résistivité faible. Dans le SI, la résistivité se mesure en V · m/A = Ω · m, où l'unité Ω = V/A est appelée ohm et sera définie à la section 6.4. Le tableau 6.1 donne les valeurs pour quelques métaux. Ce tableau est aussi présenté à l'annexe C. Le résultat du modèle simple de la conduction est que la densité de courant est directement proportionnelle au champ électrique : (6.19) La dernière équation est la version microscopique de la loi d'Ohm (nous verrons bientôt la forme plus courante de la loi d'Ohm).
Cette relation linéaire est valable dans le cas de conducteurs dans lesquels le champ électrique n'est pas trop intense. MISE EN GARDE Les symboles pour exprimer la résistivité et la conductivité sont les mêmes que pour la charge volumique et la charge surfacique, utilisées en électrostatique. Vous devez bien faire la différence entre ces quantités, selon le contexte. TABLEAU 6.1 La résistivité (ρ) et le coefficient thermique de résistivité (α) de quelques métaux à 20 °C.
L'unité Ω · m est équivalente à V · m/A. ρ (Ω · m) α (K−1) Aluminium 2,65 × 10−8 3,9 × 10−3 Argent 1,59 × 10−8 3,8 × 10−3 Cuivre 1,68 × 10−8 3,9 × 10−3 Fer 8,57 × 10−8 5,0 × 10−3 Laiton 6,08 × 10−8 2,0 × 10−3 Nichrome 1,08 × 10−6 4 × 10−4 Nickel 6,93 × 10−8 5,9 × 10−3 Or 2,21 × 10−8 3,4 × 10−3 Platine 1,05 × 10−7 3,92 × 10−3 Plomb 1,92 × 10−7 4,3 × 10−3 Tungstène 5,28 × 10−8 4,5 × 10−3 Matériau Loi d'Ohm (version microscopique) 199 200 CHAPITRE 06 — Le courant électrique EXEMPLE 6.3 Le champ dans un fil d'aluminium Un courant de 2,0 A circule dans un fil d'aluminium dont le diamètre est de 1,7 mm. a. Quel est le module du champ électrique dans le fil ?
b. Quel est le temps moyen entre deux collisions pour un électron ? SOLUTION Décortiquer le problème Nous avons besoin des données du tableau 6.1 ainsi que de valeurs présentées dans l'annexe F. (réponse) SOLUTION b. Identifier la clé La clé est l'équation 6.18 : (ii) où n est la densité de porteurs de charge, donnée par l'équation 6.6, si nous supposons que l'aluminium a un électron de conduction par atome : (iii) Résoudre le problème La densité de porteurs de charge est SOLUTION a. Identifier la clé La clé est la loi d'Ohm (l'équation 6.19) qui relie le champ électrique et la densité de courant : (iv) Nous insérons ce résultat dans l'équation (iii) : Nous cherchons seulement le module du champ. Alors, (i) avec l'équation 6.7 reliant le courant et la densité de courant.
Résoudre le problème En remplaçant les valeurs, nous obtenons 6.3 (réponse) Valider la réponse Le module du champ électrique obtenu est très faible. Il est équivalent au champ électrique à une distance de 0,25 mm d'un électron, ce qui indique qu'un très petit champ est suffisant pour générer un courant important. Le temps entre deux collisions est très faible, ce qui est le résultat attendu. La résistivité et la température Les conducteurs La résistivité des conducteurs dépend de la température, car si cette dernière augmente, les électrons ont une vitesse thermique plus grande. Ainsi, le temps moyen entre deux collisions diminue, ce qui fait augmenter la résistivité, selon 6.3 — La résistivité et la température l'équation 6.18 du modèle simple de la conduction. Le modèle est trop rudimentaire pour donner précisément la relation entre la température et la résistivité.
Pour obtenir cette relation, le modèle doit tenir compte de la nature ondulatoire des électrons selon la mécanique quantique ; nous reparlerons de la mécanique quantique dans le tome 3. Il est possible de mesurer la variation de la résistivité des métaux lorsque la température change. Pour un grand éventail de températures éloignées du zéro absolu, la résistivité augmente approximativement de façon linéaire lorsque la température augmente, comme le montre la figure 6.10. Si on connaît la résistivité ρ0 à une température T0, alors la résistivité ρ à une température T est (6.20) Le facteur α est le coefficient thermique de la résistivité. C'est une propriété du matériau, comme la résistivité. Dans le SI, α se mesure en K−1, c'est-à-dire l'inverse de l'unité de température. Le tableau 6.1 de la page 199 donne les valeurs approximatives du coefficient thermique de résistivité pour quelques métaux. Ce tableau est aussi présenté à l'annexe C. REMARQUE Dans l'équation 6.20, on a besoin d'une variation de température ΔT = T − T0. Dans le SI, un écart de 1 K correspond à un écart de 1 °C. On peut donc utiliser directement des températures exprimées en degrés Celsius plutôt qu'en kelvins. Les semi-conducteurs Au chapitre 1, nous avons séparé les matériaux en deux classes : les isolants et les conducteurs.
Dans les conducteurs, certains électrons sont faiblement liés. Avec une petite quantité d'énergie, ils quittent leurs atomes et deviennent des électrons de conduction. La charge peut se déplacer facilement, c'est-à-dire que ces matériaux ont une résistivité très faible. Un petit champ électrique produit facilement un courant électrique, car les conducteurs possèdent un grand nombre d'électrons de conduction libres de se déplacer à l'intérieur du conducteur. Dans le cas des isolants, les électrons sont tous liés fortement aux atomes. L'énergie nécessaire pour qu'un électron quitte son atome est très élevée. Il est possible d'appliquer le modèle de la conduction aux isolants. La résistivité est donnée par l'équation 6.18 : Dans le cas des isolants, la densité de porteurs de charge n est très faible, ce qui produit une très grande résistivité, au-dessus de 1010 V · m/A. La conduction est négligeable, même avec un champ électrique relativement intense. Certains matériaux, comme le silicium et le germanium, ont une résistivité intermédiaire entre les isolants et les conducteurs. Ce sont des semi-conducteurs. Dans le cas de ces matériaux, les électrons de valence ont besoin d'une quantité d'énergie relativement faible pour quitter leurs atomes. À très faible température, les électrons sont liés, et un semi-conducteur se comporte comme un isolant. Lorsque la température augmente, l'énergie thermique devient suffisante pour que certains électrons de valence deviennent des électrons de conduction. Un FIGURE 6.10 La résistivité d'un conducteur en fonction de la température 201 202 CHAPITRE 06 — Le courant électrique certain nombre d'électrons sont disponibles pour la conduction. Si on applique le modèle de la conduction aux semi-conducteurs, on s'aperçoit que la densité de porteurs de charge augmente avec la température, ce qui fait diminuer la résistivité. La figure 6.11 illustre le graphique de la résistivité en fonction de la température. Ce comportement est très différent de celui des conducteurs ; dans ce cas, la résistivité augmente avec la température à cause de la diminution du temps moyen τ entre deux collisions. FIGURE 6.11 La résistivité d'un semi-conducteur en fonction de la température Les semi-conducteurs sont très importants dans le domaine de l'électronique et de l'informatique.
Ceci vient du fait qu'il est possible de contrôler les propriétés des semi-conducteurs en ajoutant de très faibles quantités d'impuretés. C'est ce qu'on appelle le dopage. Ces impuretés modifient la densité de porteurs de charge et donc la résistivité.
La supraconductivité La résistivité d'un métal augmente lorsqu'on augmente la température. À l'inverse, la résistivité diminue lorsqu'on refroidit un conducteur. Si on refroidit ce dernier à des températures qui s'approchent du zéro absolu (T = 0 K = −273,15 °C), que va-t-il arriver à la résistivité ?
Selon le modèle de la conduction, il y a deux possibilités contraires : en diminuant la température, cela augmente le temps moyen entre deux collisions et la résistivité devrait diminuer graduellement jusqu'à zéro. Par contre, en diminuant la température, l'énergie thermique ne sera plus suffisante pour que les électrons de valence quittent leur atome ; la densité de porteurs de charge devrait diminuer, ce qui produirait une résistivité de plus en plus grande. FIGURE 6.12 Un matériau devient supraconducteur lorsque sa résistivité tombe à zéro. C'est en 1911 que le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes (18531926) et son équipe ont développé les techniques nécessaires pour produire de l'hélium liquide et refroidir les métaux à de très faibles températures. Ils ont observé que la résistivité du mercure tombe à zéro brusquement lorsque la température est plus faible qu'une température critique de 4,2 K, comme le montre la figure 6.12. Le mercure est alors supraconducteur. Un courant électrique peut circuler de façon continue dans un supraconducteur en l'absence de champ électrique, car il n'y a pas de perte d'énergie par collision.
Un champ électrique est uniquement essentiel pour amorcer le mouvement des électrons de conduction. Depuis 1911, on a découvert plusieurs matériaux supraconducteurs : des métaux mais aussi des composés. Il faut toujours une très faible température, près de 0 K, pour que ces matériaux deviennent supraconducteurs. De plus, ce ne sont pas tous les matériaux qui deviennent supraconducteurs. La résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température est présentée dans le graphique de la figure 6.12, mais avec une température critique différente de celle du mercure. En 1986, des chercheurs ont mis au point des céramiques à base d'oxyde de cuivre qui deviennent supraconductrices à une température critique autour de 90 K. Cette température est très basse, mais on peut l'atteindre en refroidissant la substance avec de l'azote liquide, qui est beaucoup moins cher à produire que l'hélium liquide. Nous reparlerons des supraconducteurs et des aimants au chapitre 9.
Le modèle de la conduction n'est pas du tout valide à basse température. Pour comprendre le comportement des supraconducteurs, il faut prendre en compte le comportement ondulatoire des électrons. Dans le cas des métaux comme le 6.4 — Le courant dans les fils conducteurs mercure près du zéro absolu, il est possible d'expliquer le comportement supraconducteur en supposant que les électrons se déplacent en paires, ce qui élimine complètement les collisions. Pour les supraconducteurs à haute température, les physiciens théoriciens sont toujours à la recherche d'une théorie qui explique correctement ce comportement.
Il est encore très onéreux d'utiliser les supraconducteurs, car il faut les garder à une très basse température. Ces derniers servent à produire les aimants les plus puissants du monde. On verra au chapitre 8 qu'un champ magnétique est créé par un courant. Comme la résistivité d'un supraconducteur est nulle, il est possible d'obtenir un courant d'une importance considérable dans des fils supraconducteurs, ce qui engendre un très grand champ magnétique. Des aimants supraconducteurs ont permis de développer les appareils d'imagerie médicale basée sur la résonance magnétique. Les aimants supraconducteurs sont aussi essentiels dans le plus grand accélérateur de particules au monde, le Grand collisionneur de hadrons (le LHC) au laboratoire de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) en Suisse, pour guider les particules chargées le long d'un anneau de 27 km de circonférence. La figure 6.13 montre un câble supraconducteur utilisé au CERN. FIGURE 6.13 À l'occasion de l'exposition Microcosme du CERN, on a comparé le diamètre d'un câble traditionnel à celui d'un câble supraconducteur pouvant transporter un courant de 12 500 A. 6.4 Le courant dans les fils conducteurs Nous avons choisi l'exemple d'un condensateur comme source d'énergie électrique lorsque nous avons étudié la conduction dans les sections 6.1 et 6.2, car il permet de comprendre facilement le mouvement des électrons dans tout le circuit. Cependant, le courant dans un circuit comportant un condensateur diminue rapidement, car il n'y a qu'une certaine quantité de charges sur chaque armature. Le condensateur possède une certaine énergie électrique qui est transformée rapidement. La plupart des circuits utilisent plutôt une pile ou une autre source de f.é.m. pour fournir de l'énergie électrique et produire un courant continu, c'est-à-dire constant. Nous allons maintenant étudier la conduction lorsqu'une pile est branchée à un conducteur. 203 204 CHAPITRE 06 — Le courant électrique À la section 4.9, nous avons vu que dans une pile, un travail est fait sur des ions, ce qui transforme de l'énergie chimique en énergie électrique.
La f.é.m. (E) représente le travail par unité de charge déplacée dans la pile. Il y a alors des charges positives accumulées sur la borne positive et des charges négatives sur la borne négative de la pile. La différence de potentiel entre les deux bornes est ΔVpile = E dans le cas d'une pile idéale. Si on relie les bornes par un conducteur, la différence de potentiel provoque un déplacement des charges à la surface du conducteur, équivalent à ce qui se passe à la figure 6.8 de la page 196 ; un champ électrique est produit à l'intérieur du conducteur, comme le montre la figure 6.14. À son tour, le champ engendre un courant électrique. On peut donc dire que c'est la pile qui est la cause du courant dans le conducteur. FIGURE 6.14 Un conducteur est branché aux bornes d'une pile. Ceci produit un champ électrique dans le conducteur ; un courant circule alors dans le circuit. Le courant dans le conducteur dépend du champ électrique qui, lui, est causé par la différence de potentiel que fournit la pile. Plus la différence de potentiel est grande, plus le champ électrique devrait être important, ce qui devrait déplacer les électrons à une plus grande vitesse de dérive et donc produire un plus grand courant. Pour obtenir la relation entre la différence de potentiel et le courant, étudions le mouvement des électrons dans une section d'un conducteur du circuit, ayant une longueur et une aire transversale A. La figure 6.15 montre le champ dans le fil et des surfaces équipotentielles, perpendiculaires au champ. Comme on l'a vu à la section 4.3, le champ électrique est orienté vers le potentiel plus faible. Calculons donc la diminution de potentiel pour une longueur du conducteur : FIGURE 6.15 Le calcul de la différence de potentiel dans un fil parcouru par un courant On choisit un élément parallèle au fil, dont le sens est celui du vecteur allant du point a vers le point b (voir la figure 6.15). De cette façon, De plus, le champ à l'intérieur du conducteur est uniforme, étant donné que le courant doit être le même partout dans le conducteur. On obtient alors (6.21) 6.4 — Le courant dans les fils conducteurs La différence de potentiel doit être positive. En effet, le champ point b (potentiel élevé) vers le point a (potentiel faible).
est orienté du On a vu à l'équation 6.19 que la densité de courant est proportionnelle au champ électrique ( ).
Le module de la densité de courant dans le conducteur est proportionnel à la différence de potentiel : où ρ est la résistivité du matériau. Pour obtenir le courant dans le fil, on utilise la définition de la densité de courant donnée par l'équation 6.7 : (6.22) Selon l'équation 6.22, le courant dans le fil dépend de la différence de potentiel aux extrémités du fil et des propriétés du fil : sa longueur, l'aire de sa section et la résistivité du matériau. Le courant est plus faible dans le cas d'un long fil ou d'un fil dont l'aire de la section est faible ou si le fil est composé d'un matériau qui est un moins bon conducteur. L'inverse de la partie entre parenthèses de l'équation 6.22 est appelé la résistance du fil : (6.23) L'équation 6.22 s'écrit alors (6.24) Le courant dans le fil est plus faible si la résistance du fil est élevée. Dans le SI, la résistance se mesure en ohms (Ω), en l'honneur du physicien allemand Georg Simon Ohm (1789-1854) qui a étudié la relation entre le courant et la différence de potentiel dans les conducteurs (voir la figure 6.16). Selon l'équation 6.24, on obtient (6.25) Ainsi, dans le SI, la résistivité se mesure en Ω · m. MISE EN GARDE Vous devez bien faire la différence entre la résistance et la résistivité. La résistivité est une propriété du matériau qui compose le fil. La résistance est une propriété d'un objet ayant des dimensions précises et qui est composé d'un matériau particulier. FIGURE 6.16 Georg Simon Ohm (1789-1854), physicien allemand 205 206 CHAPITRE 06 — Le courant électrique EXEMPLE 6.4 La résistance dans un serpentin On forme un serpentin en enroulant un fil de nichrome (un alliage de nickel et de chrome) autour d'un cylindre de carton ayant un rayon de 5,0 cm. Le fil a un diamètre de 1,0 mm, et le serpentin comporte 25,0 spires. On branche le serpentin à une pile de 1,5 V. a. Quel est le module du champ électrique dans le fil ? b. Quelle est la résistance du fil ? c. Quel est le courant dans le fil ? SOLUTION Illustrer la situation La figure 6.17 illustre une partie du serpentin, c'est-à-dire le fil enroulé sur le cylindre. (réponse) SOLUTION b. Identifier la clé Pour calculer la résistance du fil, la clé est l'équation 6.23 : FIGURE 6.17 Le fil est enroulé autour d'un cylindre de rayon rc. Chaque spire a une longueur de 2π rc. où est l'aire de la section du fil (et non le rayon du cylindre de carton). Résoudre le problème Nous obtenons Décortiquer le problème La résistivité du nichrome est donnée dans le tableau 6.1 de la page 199. (réponse) SOLUTION c. Identifier la clé La clé est l'équation 6.24, reliant la différence de potentiel et le courant : La longueur du fil de nichrome est Résoudre le problème Nous obtenons donc SOLUTION a. Identifier la clé (réponse) La clé est l'équation 6.21 : Valider la réponse Résoudre le problème En remplaçant les valeurs, nous obtenons Nous répondons bien aux questions. L'ordre de grandeur des résultats semble correct. Remarquez que le module du champ est beaucoup plus faible que les valeurs obtenues dans les chapitres précédents. 6.5 — La résistance et la loi d'Ohm 207 TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 6.2 La figure suivante montre trois fils d'aluminium, de longueur et d'aire différentes. Les trois fils sont soumis à la même différence de potentiel. Classez les fils par ordre croissant selon : a. le module du champ électrique à l'intérieur des fils ; b. la résistance des fils. (i) 6.5 (ii) (iii) La résistance et la loi d'Ohm Dans la section précédente, on a étudié la conduction dans les fils lorsque ces derniers sont branchés à une pile (ou à une autre source de f.é.m.). On peut donc énoncer ce qui suit. • La pile déplace des charges en transformant de l'énergie chimique en énergie électrique, ce qui engendre une différence de potentiel.
• Ce déplacement de charge produit un champ électrique de module constant dans le conducteur. Le champ est orienté vers le potentiel ayant des valeurs plus faibles. • Un courant est généré dans tout le circuit. Des électrons se déplacent dans le sens opposé au champ électrique.
• Le courant est partout le même dans le circuit. On peut donc dire que la f.é.m. de la pile est la cause du courant électrique dans le fil. Supposons maintenant qu'un appareil (une ampoule, un moteur ou un lecteur mp3, par exemple) est branché à une source de f.é.m. en utilisant des fils conducteurs, comme le montre la figure 6.18. On obtient un circuit électrique. La f.é.m. de la source produit une différence de potentiel ΔVsource = E à ses bornes. Ceci produit un champ électrique dans le circuit, y compris à l'intérieur de l'appareil, et un courant électrique i circule dans le circuit.
Le courant est le même partout dans le circuit, car les électrons ne peuvent s'accumuler à un endroit particulier du circuit. La différence de potentiel aux bornes de l'appareil est ΔV. On définit la résistance de l'appareil par (6.26) La résistance n'est pas nécessairement constante. Elle peut dépendre de la différence de potentiel aux bornes de l'appareil. FIGURE 6.18 Un appareil a une différence de potentiel ΔV à ses bornes et il est parcouru par un courant i. Résistance 208 CHAPITRE 06 — Le courant électrique On peut inverser la dernière équation pour obtenir le courant dans l'appareil en fonction de la résistance et de la différence de potentiel à ses bornes : (6.27) REMARQUE L'équation 6.26 est souvent écrite ΔV = Ri (ou même V = Ri) et appelée la loi d'Ohm. La version correcte de la loi d'Ohm sera présentée un peu plus loin.
L'équation 6.26 n'est qu'une autre façon d'écrire la définition de la résistance. On l'indique avec le courant du côté gauche de l'équation pour montrer que le courant est le résultat, alors que la différence de potentiel en est la cause. Les fils conducteurs ont une très faible résistance, qui est souvent négligeable par rapport aux autres éléments d'un circuit. Pour contrôler le courant dans un circuit et éviter qu'il soit trop intense, on ajoute des composants électroniques qui ont une résistance fixe. Ces composants sont appelés des résistances.
La figure 6.19 en montre quelques exemples. On les fabrique en utilisant une substance qui conduit peu, comme le carbone, ou bien à partir d'un conducteur ayant une très faible section transversale, relié à deux fils conducteurs. Il est possible de se procurer des résistances entre quelques ohms et des millions d'ohms. Dans les circuits, on utilise le symbole pour représenter les résistances. FIGURE 6.19 Quelques résistances REMARQUE Certains auteurs utilisent le terme anglais resistor ou le calque résisteur pour éviter de mélanger les composants électroniques et le concept de résistance définie par l'équation 6.26. Nous ne procédons pas de cette façon, car le contexte permet facilement de distinguer les deux termes. De plus, c'est le terme résistance qui est utilisé pour indiquer les composants à l'extérieur des écoles. Les matériaux ohmiques et les matériaux non ohmiques Si on fait varier la différence de potentiel aux bornes d'une résistance, le courant varie de façon linéaire, comme l'illustre la figure 6.20. Le rapport ΔV/i, c'est-à-dire la résistance, est constant. Lorsqu'un dispositif électronique a une résistance fixe, on dit qu'il est ohmique, qu'il est assujetti à la loi d'Ohm. En effet, selon la loi d'Ohm : Loi d'Ohm FIGURE 6.20 Le graphique du courant en fonction de la différence de potentiel dans le cas d'un matériau ohmique Dans un dispositif ohmique, le courant est directement proportionnel à la différence de potentiel.
Cette loi a été découverte par le physicien allemand Georg Simon Ohm (17891854). Ce n'est pas une loi générale mais une règle particulière. La loi s'ap plique bien dans le cas de conducteurs dont la température reste constante. Si la température du conducteur change, la résistance change aussi. C'est ce qui se produit dans le cas du filament d'une ampoule. En effet, si on augmente la différence de potentiel, un plus grand nombre de collisions se produisent entre les électrons et les atomes du conducteur, ce qui fait augmenter la température. La résistivité du matériau augmente (selon l'équation 6.20). De plus, la longueur et l'aire de la section peuvent aussi varier à cause de la dilatation 6.5 —

La résistance et la loi d'Ohm 209 thermique du matériau. La figure 6.21a présente le graphique du courant en fonction de la différence de potentiel dans le cas d'une ampoule.

Ce n'est pas une droite, ce qui montre que la résistance de l'ampoule n'est pas une constante.

L'ampoule n'est pas assujettie à la loi d'Ohm. Pour les dispositifs non ohmiques, la résistance change en fonction de la différence de potentiel appliquée. C'est le cas de l'ampoule et des semi-conducteurs. C'est aussi le cas pour les diodes, des composants fabriqués à partir de semiconducteurs. La figure 6.21b présente le graphique du courant en fonction de la différence de potentiel pour une diode. Comme le montre le graphique, la diode laisse passer le courant à partir d'une certaine différence de potentiel dans un sens et le bloque dans l'autre sens. (a) (b) FIGURE 6.21 Le graphique du courant en fonction de la différence de potentiel pour deux objets non ohmiques : (a) une ampoule, dont la résistance augmente avec la température ; (b) une diode, dont la résistance tend vers zéro pour une différence de potentiel positive et vers l'infini pour une différence de potentiel négative. EXEMPLE 6.5 La mesure de la température Une résistance de platine branchée à une pile de 3,00 V est utilisée pour mesurer la température. À 20,0 °C, on mesure un courant de 28,0 mA. Lorsqu'on place la résistance à l'intérieur d'un four, le courant mesuré est de 12,0 mA.

On suppose que la dilatation thermique est négligeable. a.

Quelle est la résistance à 20,0 °C ? b. Quelle est la température du four ?

SOLUTION Nous avons besoin du coefficient thermique de résistivité du platine, indiqué dans le tableau 6.1 de la page 199. SOLUTION a. Identifier la clé La clé est la définition de la résistance, obtenue à l'aide de l'équation 6.26 : (i) Résoudre le problème REMARQUE Comme nous calculons des différences de température, α peut s'exprimer de façon équivalente en (°C)−1 ou en K−1. Nous remplaçons les valeurs : (réponse) 210 CHAPITRE 06 — Le courant électrique SOLUTION b.

Identifier les clés (v) La première clé est de nouveau la définition de la résistance lorsque la résistance de platine est placée dans le four : Résoudre le problème Nous calculons la résistance du platine dans le four en remplaçant les valeurs dans l'équation (ii) : (ii) La deuxième clé est que le changement de température fait changer la résistivité du platine, selon l'équation 6.20 : Ensuite, nous isolons la température dans l'équa tion (v) : (iii) De plus, la résistance dépend de la résistivité, selon l'équation 6.23 : (iv) (réponse) Étant donné que la dilatation thermique est négligeable, la longueur et l'aire de la section de la résistance ne changent pas. La résistance change alors selon la même équation que la résistivité : Valider la réponse Nous répondons bien aux questions. Il est possible d'obtenir cette température dans un four.

TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 6.3 Le tableau suivant donne les valeurs du courant pour deux dispositifs soumis à des différences de potentiel données. a. Quel dispositif est ohmique ? b. Quel dispositif a la plus grande résistance pour une différence de potentiel de 3,00 V ? 6.6 ΔV i1 i2 (V) (A) (A) 0,00 0,00 0,00 1,50 0,25 0,50 3,00 0,50 0,75 La puissance dans les circuits électriques La figure 6.22 illustre un appareil électrique, tel un petit moteur, branché à une pile idéale. La f.é.m. de la pile est E, et un courant continu i circule dans le circuit. On veut étudier les transformations d'énergie dans le circuit. Pour ce faire, on analyse une charge dq qui se déplace dans le circuit. FIGURE 6.22 Une pile branchée à un moteur Lorsque la charge dq se déplace du point a au point b, la pile effectue un travail dW = dq ΔVpile = dq E. La pile transforme de l'énergie chimique en énergie 6.6 — La puissance dans les circuits électriques potentielle électrique dU = dq E. L'énergie potentielle du circuit augmente. Le taux de transfert d'énergie correspond à la quantité d'énergie transformée par unité de temps. C'est ce qu'on appelle la puissance instantanée (ou simplement la puissance) : 211 Défi animé 6.1 Comment la puissance dissipée par une résistance branchée à une pile variet-elle si on change soit sa valeur, soit la valeur de la différence de potentiel de la pile ? Or, dq/dt représente le courant dans le circuit. Donc, la puissance fournie par une source de f.é.m. idéale est (6.28) Puissance d'une f.é.m. La pile produit un champ électrique dans les fils conducteurs. Lorsque la charge dq se déplace du point b au point c, il y a des collisions avec les atomes du conducteur. Une partie de l'énergie électrique se transforme en énergie thermique. Cette énergie représente l'énergie cinétique microscopique désordonnée des atomes et se manifeste par une augmentation de la température du conducteur. Lorsque la résistance des fils est faible, cette transformation de l'énergie électrique en énergie thermique est faible. (a) Lorsque la charge dq se déplace entre les points c et d, le potentiel diminue de ΔVapp = ΔV. Cette fois-ci, l'énergie potentielle du système diminue. L'appareil transforme l'énergie potentielle électrique en une autre forme. Lorsque l'appareil est un moteur, celui-ci effectue un travail sur un objet extérieur au circuit. L'énergie électrique du système est transférée à un objet extérieur. La diminution d'énergie potentielle du système est (b) La puissance de l'appareil représente le taux de travail effectué : FIGURE 6.23 (a) La variation du potentiel dans le circuit de la figure 6.22 : (a) pour des fils réels ; (b) pour des fils idéaux ayant une résistance nulle. La puissance de l'appareil est donc (6.29) Puissance électrique Lorsque la charge dq se déplace de d à a dans le fil conducteur, elle subit de nouveau des collisions. Pour des fils idéaux, la résistance des fils est négligeable et l'énergie transformée en énergie thermique l'est aussi. Après un circuit complet, la charge revient au point a. Comme la force électrique est une force conservative, l'énergie potentielle du système revient à sa valeur initiale. Ceci implique que l'augmentation du potentiel dans la pile ΔVpile = E doit être suivie par des diminutions équivalentes du potentiel à l'intérieur des fils et du moteur. Le graphique de la figure 6.23 donne la variation du potentiel dans le circuit, dans le cas de fils réels et dans le cas de fils idéaux, ayant une résistance qui tend vers zéro. Dans cette situation, on a ΔV = E, et l'énergie chimique transformée en énergie électrique dans la pile est complètement transférée dans le moteur. Supposons maintenant qu'on remplace le moteur par une résistance R, comme dans le circuit de la figure 6.24. Cette fois-ci, l'énergie potentielle électrique se FIGURE 6.24 Le schéma d'un circuit avec une pile branchée à une résistance 212 CHAPITRE 06 — Le courant électrique transforme complètement en énergie thermique dans la résistance. C'est l'effet Joule, un phénomène étudié par le physicien anglais John-Prescott Joule (18181889). Étant donné que i = ΔV/R, on peut exprimer la puissance dans la résistance ainsi : (6.30) Puissance dans une résistance On dit parfois que l'énergie électrique est dissipée en énergie thermique dans la résistance. Ceci ne veut pas dire que l'énergie est perdue, mais plutôt que l'énergie électrique (ordonnée) est transformée en énergie thermique (désordonnée). L'énergie thermique est une forme d'énergie plus difficile à utiliser pour effectuer un travail. Elle est quand même utile pour certains aspects, entre autres en hiver lorsqu'il fait −20 °C à l'extérieur. EXEMPLE 6.6 On chauffe en hiver Un radiateur électrique est branché à une source de f.é.m. de 240 V par des fils conducteurs idéaux. Quelle est la résistance du radiateur si celui-ci transforme 2 000 W d'énergie électrique en énergie thermique ? SOLUTION Décortiquer le problème Résoudre le problème Nous obtenons La différence de potentiel aux bornes du radiateur est égale à la E, car les fils sont idéaux. (réponse) Valider la réponse Identifier la clé La clé est l'équation 6.30 : (i) La résistance doit être assez petite, de telle sorte que le courant dans le circuit soit important. Nous avons supposé que les fils étaient idéaux. En pratique, les fils ont une certaine résistance. Celle-ci doit être plus petite que la résistance du radiateur. C'est pour cette raison que les fils utilisés pour relier les radiateurs à une source de f.é.m. ont un gros diamètre. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 6.4 On applique une différence de potentiel ΔV à une résistance R, ce qui fait circuler un courant i dans celle-ci. Classez les situations suivantes par ordre croissant de la puissance dans la résistance. (i) On double la différence de potentiel sans que la résistance change. (ii) On double la résistance sans changer la différence de potentiel. (iii) On diminue la résistance de moitié, et on divise de moitié la différence de potentiel. (iv) On change la résistance afin que le courant double pour une même différence de potentiel. RÉSUMÉ QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 213 RÉSUMÉ Dans ce chapitre, nous avons étudié le courant électrique dans les conducteurs. LES DÉFINITIONS • Le courant électrique représente la charge nette qui traverse une surface par unité de temps : LES LOIS ET LES PRINCIPES • Selon la loi des nœuds, la somme algébrique des courants qui arrivent à un nœud est égale à la somme algébrique des courants qui quittent le nœud.

Le sens du courant correspond au sens du déplacement des charges positives ou au sens opposé du mouvement des charges négatives. • La densité de courant est un vecteur orienté selon la vitesse de dérive des charges : • Le courant est généré par un champ électrique de module uniforme dans le conducteur : où ρ est la résistivité et σ, la conductivité du matériau. • La résistance d'un dispositif représente le rapport entre la différence de potentiel à ses bornes et le courant : LES RÉSULTATS • Le modèle simple de la conduction permet de calculer la résistivité en fonction de la densité de porteurs de charge n et du temps moyen τ entre deux collisions : • La résistivité d'un conducteur augmente lorsque la température augmente : • Pour un semi-conducteur, la résistivité diminue lorsque la température augmente, car la densité de porteurs de charge augmente alors. • À très faible température, la résistivité tombe à zéro pour certains matériaux appelés les supraconducteurs. • Pour un dispositif ohmique, la résistance est indépendante de la différence de potentiel aux bornes du dispositif. • La résistance d'un fil conducteur, ayant une longueur l et une aire de section A, est • L'énergie est fournie à un circuit par une source de f.é.m. à une puissance : • Une résistance dissipe l'énergie électrique en énergie thermique à une puissance : 214 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Q questions qualitatives • E exercices simples • P problèmes • Section 6.1 Le courant électrique Q1 La figure 6.25 montre quatre situations où des charges se déplacent de façon horizontale dans une région quelconque, avec le taux de transfert de charge correspondant. Classez les situations selon un ordre décroissant du courant dans chacune des régions. solution disponible a. Quelle est la densité de porteurs de charge dans le fil d'aluminium ? b.

Quel est le module de la vitesse de dérive des électrons ? c.

Quel est le temps nécessaire pour qu'un électron parcoure une distance de 1,00 m ? P7 Dans un fil de cuivre de 0,500 cm de diamètre, 270 × 1010 électrons traversent vers la droite une section transversale du fil toutes les millisecondes. (i) (ii) a.

Quelle est la densité de courant qui traverse cette section ? b. Quelle est la vitesse de dérive des électrons dans le fil de cuivre ? P8 Le courant circulant dans un fil de cuivre varie en fonc- tion du temps selon l'équation suivante : (iii) (iv) FIGURE 6.25 • Question 1 Q2 Le circuit de la figure 6.26 présente les courants cir- culant dans des conducteurs. Quel est le courant i et dans quel sens est-il ? où t est exprimé en secondes et i, en ampères. Quelle est la charge qui traverse une section du fil durant l'intervalle de temps compris entre t = 2,00 s et t = 5,00 s ? P9 Un fil de forme circulaire a une densité de courant qui dépend de la distance r par rapport au centre du fil : où R est le rayon du fil. a. Calculez le courant qui circule dans le fil complet. FIGURE 6.26 • Question 2 b. Calculez le courant qui circule entre r = 0 et r = R/2. E3 Pendant 1,0 s dans une solution aqueuse, 4,5 × 1016 ions Section 6.2 Le champ électrique et la conduction positifs ayant une charge +2e se déplacent vers la gauche et 7,9 × 1016 ions négatifs, ayant une charge −e, se déplacent vers la droite. Quel est le courant et dans quel sens est-il ? Q10 Un fil de cuivre a un diamètre d. Initialement, le E4 Un courant de 2,5 A traverse une pile pendant un temps champ électrique a un module E, et un courant i circule dans le fil. Déterminez ce qui arrive à la densité du courant dans les situations suivantes : de 4,00 min. Combien d'électrons traversent une section de la pile pendant ce temps ?

a. le module du champ électrique double ; E5 La charge q(t) traversant une surface varie en fonction c. on utilise un fil ayant un diamètre deux fois plus grand. du temps selon l'équation suivante : où t est mesuré en secondes et q, en millicoulombs. Quel est le courant traversant cette surface à t = 3,0 s ? P6 Un courant de 1,50 A circule dans un fil d'aluminium ayant un diamètre de 5,19 mm. On suppose que chaque atome d'aluminium a un électron de conduction. b.

le courant double ; d. Le même champ électrique existe dans un fil d'aluminium ayant le même diamètre que le fil de cuivre. Dans quel fil la densité de courant est-elle la plus faible ? E11 Un champ électrique de dans un fil de plomb de 1,00 mm de diamètre. a. Quelle est la conductivité du matériau ? b.

Quel est le courant circulant dans le fil ? est présent QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES E12 Un champ électrique est présent dans un cylindre conducteur où la densité de porteurs de charge est de 6,61 × 1028 m−3. a.

Quelle est la vitesse de dérive des électrons du cylindre si le temps moyen entre deux collisions est de 2,00 × 10−14 s ? b. Quelle est la densité de courant dans ce cylindre ? c. Quelle est la résistivité de ce cylindre ? 215 Section 6.4 Le courant dans les fils conducteurs Q19 Classez par ordre croissant les résistances des trois fils suivants : (i) un fil de cuivre de longueur l et de section A ; (ii) un fil de cuivre de longueur 2l et de section 4A ; (iii) un fil de laiton de longueur l et de section A. Q20 Le tableau suivant montre les données de trois fils E13 Pour faire démarrer le moteur d'une automobile, un fil de cuivre de 7,00 mm de diamètre relie la batterie et le démarreur. Le courant au démarrage est de 140 A. Quel est le module du champ électrique dans le fil ? P14 En l'absence de champ électrique, un électron libre dans un métal parcourt en moyenne une distance équivalant à 60 fois le rayon de l'atome d'hydrogène avant de frapper un autre électron. Le rayon de l'atome d'hydrogène est de 0,053 nm. À la température ambiante de 20,0 °C, la vitesse thermique de ces électrons est de 115 km/s. Si on ajoute un champ électrique, la vitesse de dérive a un module de 15,0 μm/s. composés du même conducteur dans lesquels circule un même courant. Classez les fils selon un ordre croissant : a. de la résistance ; b. de la différence de potentiel à leurs extrémités. fil diamètre 1 d 2 2d longueur 3 a. Quel est le temps moyen entre deux collisions ? Q21 On étire un fil cylindrique de telle sorte que sa lon- b. Quel est le module du champ électrique dans ce métal ? gueur est doublée. Si le fil conserve sa forme cylindrique, par quel facteur change la résistance du fil ? c. Si on estime le nombre d'électrons de conduction de ce métal à 2,11 × 1028 m−3, de quel matériau est fait ce métal ? Section 6.3 La résistivité et la température Q15 La figure 6.27 montre la résistivité en fonction de la température pour trois substances différentes. Quelle substance est un semi-conducteur ? E22 On applique la même différence de potentiel à deux fils de même longueur : un fil de fer et un fil de nickel. Quel est le rapport des rayons des fils si le courant est le même dans les deux fils ?

E23 Une tige d'argent a une section carrée de 8,00 mm de côté. Quel est le diamètre d'un fil d'or cylindrique de même longueur si ce dernier a la même résistance que la tige d'argent ? E24 Un rail de chemin de fer (en fer) a une aire transversale de 60,0 cm2. Calculez la résistance du rail pour une longueur de 1,00 km. E25 On fabrique un fil à partir de trois cylindres reliés FIGURE 6.27 • Question 15 Q16 Un champ électrique constant est maintenu dans un semi-conducteur lorsque la température diminue. Comment varie la densité de courant dans le semiconducteur ? E17 À quelle température la résistivité du cuivre sera- t-elle égale à celle de l'aluminium lorsque ce dernier est à 20,0 °C ? E18 Un fil de haute tension fait d'aluminium permet de 2 fournir une densité de courant de 0,100 A/m durant l'été, lorsque la température ambiante est de 20,0 °C. Si le même champ électrique est maintenu dans le fil lorsqu'il fait −30,0 °C en hiver, que devient le module de la densité de courant de ce fil ? bout à bout. Le premier matériau est du nickel de 10,0 cm de longueur, le deuxième est du platine de 5,00 cm de longueur et le troisième, du nickel de 8,00 cm de longueur. En supposant que la résistance totale est la somme des trois résistances, déterminez la résistance totale de ce fil si chacun de ces morceaux a un rayon de 5,00 mm.

P26 Un fil de 3,00 m de longueur a une résistance de 1,50 Ω.

On l'étire jusqu'à une longueur de 10,0 m. Quelle est la nouvelle résistance du fil ? P27 Un fil a une longueur de 10,0 m et un diamètre de 4,12 mm. Lorsqu'on applique une différence de potentiel de 0,100 V, un courant de 5,03 A y circule. a. Quelle est la résistivité du matériau ?

b.

Quel est le module de la densité de courant ?

c. Quel est le module du champ électrique à l'intérieur du fil ? 216 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES P28 Un long fil de nichrome, de 2,30 mm de diamètre, est enroulé pour former un serpentin ayant un rayon de 3,50 cm.

Ce fil est utilisé dans un radiateur. Lorsqu'il est soumis à une différence de potentiel de 240 V, le courant est de 8,57 A. a. Quelle est la résistance du fil ? b. Combien de spires contient le serpentin ? P29 Un fil de platine est utilisé pour mesurer la tempé- rature d'un four. Le fil a une longueur de 20,0 cm et un diamètre de 0,201 9 mm. La différence de potentiel à ses extrémités est gardée constante à 0,400 V. Lorsque la ré sistance est placée dans le four, on mesure un courant de 237 mA. Quelle est la température du four ? P30 Un fil de cuivre de 1,00 m de longueur et ayant un dia- La somme des différences de potentiel du dispositif non ohmique et de la résistance doit être égale à la f.é.m. de la pile.

a. Quel est le courant dans le circuit ? b. Quelle est la résistance du dispositif non ohmique pour ce courant ? Section 6.6 La puissance dans les circuits électriques E35 Un radiateur de 1 250 W fonctionne lorsqu'une diffé- rence de potentiel de 115,0 V est appliquée.

a. Déterminez le courant qui circule dans le radiateur. b.

Quelle est la résistance du radiateur ? E36 Un appareil est branché à une source de f.é.m. de mètre de 0,455 mm est soumis à une différence de potentiel de 0,020 V. On place le fil dans de l'azote liquide, à une température de −196 °C.

Négligez la dilatation thermique. 120 V. Il transforme de l'énergie électrique à un taux de 100 W. À quel taux transforme-t-il l'énergie électrique si la différence de potentiel est réduite à 60 V ? (On suppose ici que la variation de la résistance est négligeable.) a. Quelle est la résistance du fil dans l'azote liquide ? E37 Une bouilloire a une puissance de 1,50 kW lorsqu'elle b. Quel est le courant dans le fil ?

Section 6.5 La résistance et la loi d'Ohm est utilisée en Amérique du Nord, avec une différence de potentiel de 120 V. Quelle est la puissance de cette bouilloire si on l'utilise en Europe, où la différence de potentiel des prises de courant est de 220 V ? Négligez la varia tion de résistance avec la température. Q31 Quatre fils sont branchés indépendamment à une pile. E38 Un radiateur est branché à une source de f.é.m.

de Classez les situations selon un ordre croissant du courant qui circule dans les fils suivants : 240 V. Sa résistance, lorsqu'il est chaud, est de 24,0 Ω.

c. Quel est le module de la vitesse de dérive des électrons de conduction ? (i) un fil de cuivre de longueur et de section A ; (ii) un fil d'aluminium de longueur et de section A ; a. Quelle est la puissance du radiateur ? b. Déterminez le courant qui circule dans le radiateur. (iii) un fil de cuivre de longueur 2 et de section A ; c. Si l'électricité coûte 0,080 0 $ par kilowattheure, quel est le coût d'utilisation du radiateur pendant 4,00 h ? (iv) un fil d'aluminium de longueur E39 Une pile de f.é.m.

de 1,45 V est branchée à un circuit. et de section 2A. E32 Une source de f.é.m. de 12,0 V est branchée à un cir- Le courant est de 4,00 mA. cuit dont la résistance est de 3,00 kΩ. Déterminez le courant qui circule dans ce circuit.

a.

Quelle est la charge qui circule dans la pile chaque seconde ? E33 Une ampoule est faite d'un filament de tungstène. b. Quelle est la puissance fournie par la pile ? Lorsqu'elle est branchée à une source de f.é.m. de 120 V, la température monte jusqu'à 2 100 °C, et un courant de 0,500 A circule à travers l'ampoule. Calculez la résistance de l'ampoule lorsque celle-ci est à une température de 20 °C. c. Quelle est l'énergie potentielle électrique obtenue en 1,00 min ? P34 Pour un dispositif non ohmique, la différence de potentiel à ses bornes varie en fonction du courant selon l'équation suivante : P40 Un élément chauffant en forme de serpentin est fabriqué en enroulant un fil de nichrome de 2,59 mm de diamètre sur un cylindre de 5,00 cm de rayon. Le fil est branché à une source de f.é.m. de 120 V. L'élément chauffant a alors une puissance de 800 W, et sa température est de 120 °C. a. Quelle est la résistance du fil lorsque celui-ci est chaud ? Pour tester ce dispositif, on le branche dans un circuit comprenant une batterie de 12,0 V et une résistance de 500 Ω. b.

Quelle est la résistance du fil à 20,0 °C ? c. Quel est le nombre de spires du serpentin ? SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 217 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 6.1 i = 0,7 A, vers le bas Le courant est conservé à chaque nœud.

Le courant de 0,5 A se divise au nœud de gauche en 0,2 A et en 0,3 A. Ensuite, pour le nœud de droite, il y a un courant de 0,3 A et un courant de 0,4 A qui arrivent. Donc, le courant qui sort du nœud est 0,3 A + 0,4 A = 0,7 A vers le bas. 6.2 a. (ii) < (i) < (iii) Le module du champ dans un conducteur est E = (ΔV)/ . Les fils sont soumis au même ΔV, donc le module du champ dépend de l'inverse de la longueur. b. (i) < (ii) = (iii) La résistance dans un fil est R = ρ /A. Les fils ont la même résistivité, car ils sont faits de la même substance. 6.3 a. Le dispositif 1 b. Le dispositif 1 6.4 (ii) = (iii) < (iv) < (i) La résistance R = ΔV/i du dispositif 1 demeure constante, alors que la résistance du dispositif 2 change.

Pour une différence de potentiel de 3,00 V, le courant est plus faible dans le dispositif 1. Puisque R = ΔV/i, un courant plus faible implique une résistance plus grande. La puissance est donnée par P = (ΔV)2 /R = (ΔV)i. Chapitre 218 Les circuits à courant continu Buts du chapitre Ce chapitre expose une méthode générale pour l'analyse des circuits. Après l'étude de ce chapitre, vous serez en mesure : • d'utiliser les lois de Kirchhoff pour analyser les circuits ; • d'examiner des circuits comportant plusieurs résistances et plusieurs sources de f.é.m. ; • d'obtenir les caractéristiques d'une pile réelle ; • d'étudier les circuits avec un condensateur en mode transitoire. Préalables Ce chapitre porte sur les circuits. Revoyez : • le potentiel électrique et les sources de différence de potentiel, expliqués à la section 4.2 et à la section 4.9 ; • le courant électrique, abordé dans les sections 6.1 et 6.4 ; • la résistance et la capacité d'un condensateur, présentées respectivement à la section 6.5 et à la section 5.1 ; • la puissance électrique, décrite à la section 6.6. 219 Un stimulateur cardiaque comprend un circuit qui inclut une résistance et un condensateur. 220 CHAPITRE 07 — Les circuits à courant continu Au chapitre 6, nous avons étudié la conduction dans les conducteurs. Nous avons vu qu'en branchant une source de f.é.m.

dans un circuit électrique, l'énergie électrique peut être transformée en une autre forme. Les appareils électriques et électroniques qui nous entourent sont constitués de plusieurs sources de f.é.m., de résistances, de condensateurs et d'autres dispositifs électriques branchés dans des circuits. Ces circuits peuvent être simples ou complexes, mais les règles pour les analyser sont les mêmes. TABLEAU 7.1 Les symboles utilisés dans les circuits Composants Symbole Dans ce chapitre, nous allons apprendre les règles permettant d'analyser les circuits électriques, qu'on appelle les lois de Kirchhoff. À l'aide de ces règles, nous pourrons calculer le courant à un endroit quelconque et la différence de potentiel entre deux points quelconques. Nous allons étudier les circuits composés de sources de f.é.m. et de résistances, ainsi que les caractéristiques d'une pile réelle. Enfin, notre étude portera sur les circuits simples qui contiennent des condensateurs, comme le circuit du stimulateur cardiaque illustré en début de chapitre. 7.1 Pile Les dispositifs électriques et les diagrammes Un circuit électrique est composé de plusieurs éléments qu'on appelle des dispositifs électriques. Ce sont par exemple des sources de f.é.m. comme les piles, des résistances et des condensateurs. Ils sont reliés par des fils conducteurs.

On utilise aussi des appareils de mesure, comme un ampèremètre pour mesurer le courant dans un conducteur ou un voltmètre pour mesurer la différence de potentiel entre deux points. Afin de représenter les circuits, on emploie des diagrammes et on remplace les dispositifs par des symboles. Un tableau des symboles a déjà été présenté à la section 5.4 ; ces derniers le sont de nouveau, avec quelques ajouts, dans le tableau 7.1 et à l'annexe C. Résistance Condensateur Fil Interrupteur 7.2 Ampèremètre Les lois de Kirchhoff La première règle pour l'analyse des circuits est une relation entre les courants dans un circuit. Nous avons vu à la section 6.1 que lorsqu'il y a un nœud, c'est-à-dire un point de jonction entre des conducteurs, le courant est conservé, puisque la charge électrique est conservée.

On obtient donc : Voltmètre La somme algébrique des courants qui arrivent à un nœud est égale à la somme algébrique des courants qui quittent ce nœud. De façon mathématique, la loi des nœuds peut s'écrire ainsi : Loi des nœuds (7.1) Par exemple, à la figure 7.1, un courant i1 et un courant i2 arrivent au nœud, alors qu'un courant i3 et un courant i 4 le quittent. Pour ce nœud, selon la loi des nœuds, on a FIGURE 7.1 Un exemple de l'utilisation de la loi des nœuds On appelle branche une portion de circuit située entre deux nœuds. Étant donné que la charge est conservée, le courant doit être le même partout dans une branche. 7.2 — Les lois de Kirchhoff 221 La deuxième loi fait intervenir les différences de potentiel dans le circuit. Nous avons vu à la section 4.1 que la force électrostatique est une force conservative. Ceci permet de présenter une fonction énergie potentielle électrique U pour un système. Lorsqu'une charge effectue un parcours fermé, l'énergie potentielle du système ne change pas. Dans un circuit, un parcours fermé est appelé une maille. Le potentiel électrique a été défini comme l'énergie potentielle par unité de charge. Si on prend une charge test q0 qui se déplace le long d'une maille, on obtient Une maille peut contenir plusieurs dispositifs différents. Comme la charge test est quelconque, on obtient la loi des mailles : La somme algébrique des différences de potentiel aux bornes des éléments formant une maille est nulle. De façon mathématique, la loi des mailles s'écrit (7.2) Loi des mailles où ΔVi est la différence de potentiel aux bornes du dispositif i. Cette loi signifie que dans une maille, le potentiel augmente dans certains dispositifs (ΔVi > 0) et diminue dans d'autres (ΔVi < 0). Prenons par exemple la maille illustrée à la figure 7.2, qui comprend quatre dispositifs quelconques. Pour faire l'analyse, on choisit un point de la maille comme point de départ et on choisit un sens (ici antihoraire). On calcule les différences de potentiel sur toute la maille, jusqu'à ce qu'on revienne au point de départ. Dans cet exemple, la loi des mailles implique : FIGURE 7.2 Un exemple de l'utilisation de la loi des mailles La loi des nœuds et la loi des mailles sont des règles générales qui sont utilisées pour analyser des circuits. On les appelle les lois de Kirchhoff, car elles ont été formulées par le physicien allemand Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) (voir la figure 7.3), alors qu'il était encore étudiant. Ces deux lois seront les équations principales du présent chapitre. Le calcul des différences de potentiel Pour bien utiliser la loi des mailles, il faut calculer la différence de potentiel aux bornes des différents dispositifs d'un circuit. Habituellement, la résistance dans les fils conducteurs est négligeable par rapport aux autres dispositifs d'un circuit. On peut alors négliger la différence de potentiel dans les fils. • Pour une source de f.é.m., la différence de potentiel est |ΔV | = E. La différence de potentiel est positive si on va de la borne − à la borne +, et elle est négative si on va de la borne + à la borne −. • Pour une résistance, la différence de potentiel est |ΔV | = Ri. Le courant est orienté vers le point ayant un potentiel plus faible. Pour aider à déterminer le bon signe dans la différence de potentiel, on peut ajouter un + devant la FIGURE 7.3 Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), physicien allemand 222 CHAPITRE 07 — Les circuits à courant continu borne où le courant entre dans la résistance et un − vis-à-vis de la borne où le courant sort de la résistance. Le signe de la différence de potentiel est négatif si on va dans le sens du courant (du + au −), et il est positif si on va à l'opposé du courant (du − au +). • Pour un condensateur, la différence de potentiel est |ΔV| = Q/C, où Q est la charge du condensateur. Le signe de la différence de potentiel dépend du sens utilisé dans la maille : si on va de l'armature négative à l'armature positive, la différence de potentiel est positive, et elle est négative dans le cas contraire.

Dans les prochaines sections, nous étudierons le régime permanent des circuits, c'est-à-dire le courant et les différences de potentiel après un temps suffisamment long pour que le courant ne change pas dans le temps. Dans ce cas, une branche qui contient un condensateur a un courant nul, car celui-ci est chargé ; il se comporte comme un circuit ouvert. Nous allons étudier le régime transitoire dans les circuits ayant un condensateur à la section 7.7. EXEMPLE 7.1 La différence de potentiel par trois chemins La figure suivante présente un circuit. À un certain instant, les courants dans les branches sont i1 = 3,31 mA et i2 = 2,85 mA. Le condensateur porte une charge Q = 1,00 μC. a. Quel est le courant i3 ? b. Calculez la différence de potentiel Vd − Va pour un parcours qui passe par le point b. c. Calculez la différence de potentiel Vd − Va pour un parcours qui passe par le point c. d. Calculez la différence de potentiel Vd − Va pour un parcours qui passe par la point f. SOLUTION a. Décortiquer le problème E1 = 3,00 V E2 = 1,50 V R1 = 500 Ω R 2 = 1,00 kΩ R 3 = 750 Ω C = 1,00 μF Identifier la clé La clé est la loi des nœuds. Pour le nœud d, (i) 7.2 — Les lois de Kirchhoff 223 SOLUTION c. Décortiquer le problème Résoudre le problème Nous obtenons (réponse) SOLUTION Illustrer la situation À la figure 7.4, nous redessinons le circuit en plaçant les courants à côté des résistances. Nous ajoutons un + à l'endroit où un courant entre dans la résistance et un − à l'endroit où un courant sort d'une résistance. On se déplace dans la branche du centre. Identifier la clé Cette fois-ci, nous traversons E2 de la borne + à la borne − (ΔV < 0). De même, nous traversons la résistance dans le sens opposé au courant (du − au +, donc ΔV > 0). La clé est alors (iii) Résoudre le problème Nous obtenons (réponse) FIGURE 7.4 Le circuit pour l'exemple 7.1 SOLUTION d. Décortiquer le problème Identifier la clé Pour calculer la différence de potentiel entre deux points, la clé est de partir du point initial et de se rendre au point final en calculant la somme algébrique des différences de potentiel à travers les dispositifs traversés.

On se déplace dans la branche de droite. Identifier la clé SOLUTION b. Décortiquer le problème Nous traversons la résistance dans le sens opposé au courant (du − au +, donc ΔV > 0). Nous traversons ensuite le condensateur de l'armature négative vers l'armature positive (ΔV > 0). La clé est alors (iv) De a à d en passant par le point b signifie que le déplacement se fait dans la branche de gauche. Résoudre le problème Identifier la clé À partir du point a, nous traversons E1 de la borne − à la borne + (ΔV > 0), puis la résistance R1 dans le sens du courant (du + au −, donc ΔV < 0) : Nous obtenons (ii) Résoudre le problème (réponse) Valider la réponse Nous obtenons (réponse) Pour les trois parcours, nous obtenons la même différence de potentiel entre les points a et d, comme il se doit. 224 CHAPITRE 07 — Les circuits à courant continu TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 7.1 Dans le circuit suivant, un dispositif inconnu est branché à une pile de 1,5 V et à une résistance. La différence de potentiel aux bornes de la résistance est de 2,5 V. Quelle est la différence de potentiel V b − Va ? 7.3 FIGURE 7.5 Une pile réelle peut être analysée comme une pile idéale avec une résistance interne. Les piles réelles À la section 4.9, nous avons vu qu'une pile est une source de f.é.m. qui produit une différence de potentiel à ses bornes. Dans le cas d'une pile idéale, la différence de potentiel ne dépend pas du courant qui la traverse, et elle est égale à la f.é.m. (ΔVpile = E).

Dans le cas d'une pile réelle, le courant affecte la différence de potentiel aux bornes de la pile : en circuit ouvert, ΔVpile = E, alors que lorsqu'un courant circule dans la pile, la différence de potentiel est différente de la f.é.m. Ainsi, la pile possède une résistance interne. On modélise une pile réelle comme une pile idéale accompagnée d'une résistance interne r, comme le montre la figure 7.5. Pour obtenir l'effet de la résistance interne sur la différence de potentiel aux bornes de la pile, on branche une pile à une résistance R. À la figure 7.6a, l'interrupteur est ouvert, et il n'y a pas de courant dans la pile.

La différence de potentiel aux bornes de la pile est ΔVpile = V b − Va. On obtient La différence de potentiel aux bornes de la pile correspond à la f.é.m. À la figure 7.6b, l'interrupteur est fermé, et un courant i circule dans la pile (de la borne négative à la borne positive) et dans le circuit.

On calcule le courant à l'aide de la loi des mailles, en commençant au point a et en parcourant la maille en sens horaire : (7.3) (a) (b) FIGURE 7.6 Une pile réelle est branchée à une résistance. (a) L'interrupteur est ouvert. (b) L'interrupteur est fermé. À partir de ce courant, on calcule la différence de potentiel aux bornes de la pile : 7.3 — Les piles réelles 225 (7.4) La différence de potentiel est plus faible que la f.é.m., sauf si r = 0, ce qui correspond à une pile idéale. Si la résistance R est beaucoup plus grande que la résistance interne, alors ΔVpile ≈ E, et on peut négliger l'effet de la résistance interne de la pile. Si le courant circule de la borne positive à la borne négative (ce qui est le cas lorsqu'on recharge une pile), la différence de potentiel à ses bornes sera plus élevée que la f.é.m. La f.é.m. correspond à l'énergie chimique par unité de charge transformée en énergie électrique dans la pile. La résistance interne transforme une partie de l'énergie électrique en énergie thermique. Pour cette raison, si un courant important circule dans une pile, celle-ci va devenir chaude.

On peut distinguer le taux d'énergie chimique transformée (PE , la puissance de la f.é.m.), le taux d'énergie thermique dissipée dans la pile (Pr , la puissance dissipée dans la résistance interne) et le taux d'énergie nette fournie par la pile (Ppile, la puissance fournie par la pile au circuit) : (puissance de la f.é.m.) (7.5) (puissance de la résistance interne) (7.6) (puissance fournie par la pile). (7.7) Dans de nombreuses situations, la résistance interne d'une pile est beaucoup plus petite que les autres résistances, et on peut considérer la pile comme une pile idéale. C'est ainsi que nous procéderons dans les prochaines sections, à moins d'un avis contraire. Défi animé 7.1 La différence de potentiel aux bornes d'une pile réelle placée dans un circuit est-elle toujours inférieure à sa f.é.m. ? TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 7.2 La figure suivante montre une pile réelle branchée à une résistance. Le circuit est en fonction durant un grand intervalle de temps. La résistance interne de la pile augmente légèrement avec le temps. Comment varie alors le courant dans la résistance ? EXEMPLE 7.2 La résistance interne d'une pile On branche une pile de 1,50 V à une résistance de 4,00 Ω. On mesure une différence de potentiel de 1,38 V aux bornes de la pile. a. Quelle est la résistance interne de la pile ? b. Quelle est la puissance dissipée dans la pile ? 226 CHAPITRE 07 — Les circuits à courant continu SOLUTION Illustrer la situation Le circuit est illustré à la figure 7.7. (réponse) SOLUTION b. Identifier la clé La clé est que la puissance dissipée dans la pile correspond à la puissance dans la résistance interne : FIGURE 7.7 Le circuit pour l'exemple 7.2 (iii) Décortiquer le problème où le courant est calculé à l'aide de la loi des mailles : (iv) Résoudre le problème SOLUTION a. Identifier les clés La première clé est la loi des mailles. Nous pouvons commencer au point a : (i) Ensuite, la deuxième clé consiste à calculer en fonction de r : Nous calculons d'abord le courant dans le circuit à l'aide de l'équation (iv) : (v) Nous obtenons ensuite la puissance dissipée dans la pile : (réponse) (ii) Valider la réponse Résoudre le problème Nous insérons l'équation (i) dans l'équation (ii) et remplaçons les valeurs : 7.4 Les réponses sont arrondies à deux chiffres significatifs à cause de la soustraction utilisée dans le calcul de la résistance interne. L'association de résistances Pour des circuits constitués d'une seule source de f.é.m. et de plusieurs résistances, il est possible de trouver un circuit équivalent, constitué d'une source de f.é.m. et d'une seule résistance. À partir du circuit équivalent, on peut déterminer le courant qui circule dans la pile, puis calculer le courant et la différence de potentiel dans chaque résistance. Cette méthode est équivalente à celle qui a été présentée à la section 5.4 pour analyser les circuits de condensateurs. Les résistances en série Lorsque des résistances sont branchées l'une à la suite de l'autre, comme le montre la figure 7.8, on dit qu'elles sont branchées en série. Ce circuit ne possède qu'une seule maille, sans nœud. On peut donc énoncer ce qui suit. FIGURE 7.8 Les résistances sont branchées en série. Lorsque des éléments d'un circuit sont branchés en série, ils sont parcourus par le même courant. 7.4 — L'association de résistances Dans la présente situation, (en série) . (7.8) On veut remplacer le circuit par un circuit ayant une seule résistance équivalente, comme le montre la figure 7.9b. Le circuit est équivalent si, pour une même source de f.é.m., on obtient un même courant i. Afin d'obtenir la relation entre la résistance équivalente et les résistances du circuit initial, on utilise la loi des mailles pour chaque circuit. D'abord, pour le circuit original de la figure 7.9a, on considère la maille abcda : (7.9) Dans le cas du circuit équivalent de la figure 7.9b, on applique la loi des mailles pour la maille abefa: (7.10) En comparant les équations 7.9 et 7.10, on obtient Si le circuit comprend N résistances en série, la résistance équivalente est la somme des résistances : (7.11) FIGURE 7.9 (a) Un circuit de résistances en série. (b) Le circuit équivalent. REMARQUE La résistance équivalente d'un groupement de résistances en série est plus grande que chacune des résistances du circuit initial. Le courant est le même dans les résistances branchées en série. On le calcule à l'aide du circuit équivalent. Si ΔV = V b − Va (ce qui correspond ici à E), le courant est donné par l'équation 6.26 : (7.12) La différence de potentiel est différente pour chaque résistance. Selon l'équation 6.26, la différence de potentiel aux bornes d'une résistance est ΔV = Ri, ce qui donne, pour le circuit de la figure 7.9a, avec deux résistances en série, (7.13) (7.14) Résistance équivalente (en série) 227 228 CHAPITRE 07 — Les circuits à courant continu On voit que la différence de potentiel ΔV se divise en deux. Pour cette raison, on dit que l'association de deux résistances en série constitue un diviseur de tension. La résistance la plus élevée a la plus grande différence de potentiel. La puissance fournie par la source de f.é.m. est transformée en énergie thermique dans les deux résistances. Pour un circuit à deux résistances, la puissance dans chacune d'elles est, selon l'équation 6.30 de la page 212, (7.15) (7.16) Comme le courant est le même dans les deux résistances, c'est la plus grande résistance qui dissipe la plus grande puissance. FIGURE 7.10 Si on débranche un élément en série, le courant devient nul.

Si on débranche un élément du circuit en série, comme le montre la figure 7.10, le courant ne passe plus. Ceci est équivalent à ajouter une résistance R → ∞. La résistance équivalente du circuit devient infinie. Cette façon de procéder est utilisée dans les éléments de sécurité tels que les fusibles et les disjoncteurs. Ces éléments sont montés en série dans un circuit. Si le courant dans le circuit dépasse une valeur prédéfinie, le fusible et le disjoncteur se comportent comme un interrupteur ouvert, et le courant tombe à zéro. Les fusibles (voir la figure 7.11) et les disjoncteurs permettent d'éviter que le courant dans un circuit devienne très important, ce qui pourrait produire une surchauffe et endommager le circuit et même provoquer un incendie. En résumé, pour un groupement de N résistances en série, • Chaque résistance est parcourue par le même courant : FIGURE 7.11 Un fusible utilisé pour protéger un ampèremètre d'un courant trop important • La différence de potentiel aux bornes d'une résistance Rj est ΔVj = Rji. La différence de potentiel et la puissance dissipée sont plus grandes pour la résistance la plus élevée. • L'ensemble peut être remplacé par une résistance équivalente avec le même courant i. • La différence de potentiel aux bornes du circuit équivalent (ΔV) est égale à la somme des différences de potentiel de chaque élément : TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 7.3 Le circuit suivant montre trois résistances branchées à une pile, où R1 < R 2 < R3. Classez les résistances selon un ordre croissant : a. du courant qui les traverse ; b. de la différence de potentiel à leurs bornes ; c. de la puissance dissipée. 7.4 — L'association de résistances Les résistances en parallèle La figure 7.12 illustre un circuit où deux résistances sont branchées en parallèle, c'est-à-dire que leurs bornes sont reliées ensemble. Les points de jonction a et b sont des nœuds. La différence de potentiel aux bornes de R1 est la même que la différence de potentiel aux bornes de R 2, c'est-à-dire Va − V b. Des éléments branchés en parallèle ont tous la même différence de potentiel. FIGURE 7.12 Les résistances sont branchées en parallèle. On peut donc dire que, pour la situation illustrée à la figure 7.12, Comme dans le cas des résistances en série, il est possible de remplacer le circuit par un circuit équivalent, composé d'une seule résistance, pour lequel la source de f.é.m. fournira le même courant i que le circuit original. Comme le montre la figure 7.13a, le courant i qui se déplace dans la source de f.é.m. se divise en deux au nœud a. Selon la loi des nœuds, (7.17) On calcule le courant dans chaque résistance à l'aide de l'équation i = ΔV/R = E/R pour le circuit initial et pour le circuit équivalent : En insérant ces résultats dans l'équation 7.17, on obtient La résistance équivalente d'un circuit en parallèle se calcule à partir de l'addition des inverses des résistances. En général, si le circuit est composé de N résistances, la résistance équivalente est (7.18) REMARQUE La résistance équivalente d'un circuit en parallèle est plus faible que chacune des résistances du circuit initial. À partir du circuit équivalent, on calcule le courant i : (7.19) FIGURE 7.13 (a) Un circuit de résistances en parallèle. (b) Le circuit équivalent. Résistance équivalente (en parallèle) 229 230 CHAPITRE 07 — Les circuits à courant continu Le courant dans chacune des résistances est (7.20) On voit que le courant est plus intense dans la résistance la plus faible.

Dans le cas particulier de deux résistances en parallèle de la figure 7.13a, on peut utiliser un même dénominateur dans l'addition des inverses et obtenir (7.21) Avec deux résistances, le courant i se divise en deux au nœud a. Ce circuit est appelé un diviseur de courant.

Avec la résistance équivalente donnée à l'équation 7.21, on obtient la relation suivante pour le circuit équivalent : Insérons ce résultat dans l'équation 7.20 pour obtenir le courant dans chaque résistance en fonction du courant i : (7.22) (7.23) L'énergie fournie par la source de f.é.m.

est dissipée dans chacune des résistances. Comme P = (ΔV)2 /R, on obtient Donc, c'est la plus petite résistance qui dissipe la plus grande puissance lorsque les résistances sont en parallèle. Ceci peut vous sembler bizarre à première vue, étant donné que la puissance peut se calculer à l'aide de l'équation P = Ri2, mais en fait, le courant est plus élevé dans la plus petite résistance. FIGURE 7.14 Si on débranche une résistance dans le circuit en parallèle, comme le montre la figure 7.14, ceci ne change rien pour l'autre résistance. En effet, la résistance R 2 est soumise à la même différence de potentiel, de telle sorte que le même courant circule dans cette résistance. Pour cette raison, les circuits d'une installation électrique sont des circuits en parallèle. Si vous éteignez votre téléviseur, cela ne change pas le circuit de la lampe qui éclaire votre salon. On débranche la résistance R1. Ceci ne change rien pour la résistance R 2. En résumé, pour un groupement de N résistances en parallèle : • Chaque résistance a la même différence de potentiel à ses bornes : • Le courant dans une résistance Rj est ij = (ΔV)/Rj. Le courant et la puissance dissipée sont plus importants dans la plus petite résistance. Défi animé 7.2 Deux ampoules ayant des résistances différentes sont branchées à une pile.

Le type de branchement (en série ou parallèle) influe-t-il sur la luminosité des ampoules ? Quelle ampoule sera la plus lumineuse ? • L'ensemble peut être remplacé par une résistance équivalente : avec la même différence de potentiel ΔV et un courant i = i1 + i2 + · · · + iN. 7.4 — L'association de résistances TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 7.4 Dans le circuit suivant, les quatre résistances sont identiques. Classez les résistances par ordre croissant selon la puissance dissipée.

Les circuits mixtes Pour des circuits ayant une seule source de f.é.m.

et des résistances, la méthode de la résistance équivalente permet de calculer le courant et la différence de potentiel pour chaque résistance. La technique suivante peut être utilisée. TECHNIQUE 7.1 Les circuits de résistances ayant une seule source 1. Identifier une partie du circuit comme un ensemble de résistances en série (l'une à la suite de l'autre) ou en parallèle (avec les bornes de chacune reliées à un même nœud). Calculez la résistance équivalente de l'ensemble : (en série) (en parallèle) 2. Redessiner le circuit avec la résistance équivalente de cette partie. 3. Répéter les étapes précédentes jusqu'à ce qu'il ne reste qu'une seule résistance branchée à la source de la f.é.m. Le courant dans le circuit est 4. Retourner en arrière pour remplacer les résistances équivalentes par les résistances initiales. • Pour des résistances en série, elles ont le même i, et ΔVj = Rji. • Pour des résistances en parallèle, elles ont le même ΔV, et ij = (ΔV)/Rj. EXEMPLE 7.3 Un circuit de résistances On branche quatre résistances à une batterie de 12,0 V, comme le montre la figure suivante. a.

Quelle est la puissance fournie par la batterie ? b.

Déterminez le courant et la différence de potentiel pour chaque résistance. R1 = 500 Ω R 2 = 800 Ω R 3 = 1 100 Ω R4 = 400 Ω 231 232 CHAPITRE 07 — Les circuits à courant continu Le courant i du circuit est SOLUTION a. Décortiquer le problème Pour calculer la puissance de la pile, nous devons remplacer le circuit par un circuit équivalent, avec une seule résistance. Identifier la clé Pour calculer la puissance de la pile, la clé est l'équation 6.28 : (i) Pour déterminer le courant i, nous devons remplacer le circuit par le circuit équivalent, avec une seule résistance. Selon l'équation (i), la puissance de la pile est PE = 12,0 V × 0,011 74 A = 0,141 W .

(réponse) SOLUTION b. Identifier la clé Nous devons reconstruire le circuit initial. Résoudre le problème Résoudre le problème i = i1 = i234 = 0,011 74 A = 11,7 mA La résistance équivalente R 34 est ΔV1 = R1i1 = 500 Ω × 0,011 74 A = 5,87 V ΔV234 = R 234 i234 = 522 Ω × 0,011 74 A = 6,13 V R 34 = 1 100 Ω + 400 Ω = 1 500 Ω . La résistance équivalente R 234 est La résistance équivalente du circuit est Réq = 500 Ω + 522 Ω = 1 022 Ω .

i34 = i3 = i 4 = 4,11 mA 7.5 — Les instruments de mesure ΔV3 = R 3i3 = 1 100 Ω × 4,11 × 10−3 A = 4,49 V −3 ΔV4 = R4i 4 = 400 Ω × 4,11 × 10 A = 1,64 V En résumé, le courant et la différence de potentiel de chaque résistance sont : 7.5 i1 = 11,7 mA ΔV1 = 5,87 V i2 = 7,66 mA ΔV2 = 6,13 V i3 = 4,11 mA ΔV3 = 4,49 V i 4 = 4,11 mA ΔV4 = 1,64 V

.

Valider la réponse Nous vérifions que i2 + i3 = i1, que ΔV1 + ΔV2 = E et que ΔV3 + ΔV4 = ΔV2, comme il se doit pour le présent circuit. L'ordre de grandeur est correct. Les instruments de mesure Pour mesurer le courant dans une branche, on doit ouvrir le circuit et placer un ampèremètre, comme à la figure 7.15. Le courant doit traverser l'appareil. Un appareil réel possède une certaine résistance interne r, que le fabricant indique dans les spécifications. L'appareil change le courant dans la branche, car en le branchant, on ajoute une résistance r en série avec les autres éléments de la branche.

L'effet est négligeable si la résistance interne de l'ampèremètre est beaucoup plus faible que la résistance des autres éléments dans la branche. Si ce n'est pas le cas, on doit en tenir compte dans l'analyse en ajoutant la résistance interne r en série avec les autres éléments de la branche. (a) 233 (b) FIGURE 7.15 Pour mesurer le courant entre les points a et b, on insère un ampèremètre entre ces points. La différence de potentiel entre deux points d'un circuit se mesure avec un voltmètre. Contrairement à l'ampèremètre, on n'ouvre pas le circuit pour utiliser le voltmètre ; il suffit de le brancher entre les points où l'on veut mesurer la différence de potentiel, comme le montre la figure 7.16. L'appareil est donc branché en parallèle par rapport aux éléments situés entre les points a et b. Pour que le voltmètre ait un effet négligeable sur le circuit, il faut que sa résistance interne r soit beaucoup plus grande que la résistance des éléments entre les points a et b. Typiquement, la résistance interne d'un voltmètre est de l'ordre de la dizaine de mégohms. Dans ce cas, on doit se préoccuper de sa résistance interne seulement si les résistances sont de l'ordre de 106 Ω ou plus grandes. Un multimètre est un appareil qui regroupe les fonctions d'ampèremètre et de voltmètre, en plus de fonctions comme celles d'un ohmmètre pour mesurer la résistance et parfois d'un capacimètre pour mesurer la capacité des condensateurs.

FIGURE 7.16 Pour mesurer la différence de potentiel entre les points a et b, on branche un voltmètre entre ces points. 234 CHAPITRE 07 — Les circuits à courant continu EXEMPLE 7.4 L'influence d'un ampèremètre Pour mesurer le courant dans le circuit de la figure ci-contre, on branche un ampèremètre entre les points a et b.

La f.é.m. est de 1,50 V, la résistance est de 80,0 Ω et la résistance interne de l'ampèremètre, de 10,0 Ω. a.

Quelle est la valeur de courant indiquée par l'appareil ? b. Quelle est la différence de potentiel aux bornes de la résistance R ?

SOLUTION Illustrer la situation (i) Le fait de brancher un ampèremètre entre les points a et b équivaut à ajouter une résistance r (la résistance interne de l'ampèremètre) entre ces points. La figure 7.17 illustre le circuit.

Résoudre le problème En remplaçant les valeurs, nous obtenons (réponse) SOLUTION b. Identifier la clé La clé pour calculer la différence de potentiel aux bornes d'une résistance est la définition de la résistance (voir l'équation 6.26) : FIGURE 7.17 ΔV = Ri .

Le circuit de l'exemple 7.4 Résoudre le problème Nous obtenons Décortiquer le problème (réponse) Valider la réponse SOLUTION a. Identifier la clé La clé est la loi des mailles pour le circuit complet. Le courant i est le même dans tout le circuit, car il n'y a pas de nœud. En commençant à la borne négative de la source de f.é.m., nous obtenons 7.6 La différence de potentiel aux bornes de la résistance R est plus faible que la f.é.m., car il y a une diminution de potentiel aux bornes de la résistance interne de l'ampèremètre. Si on enlève l'ampèremètre, le courant sera plus élevé, et la différence de potentiel dans la résistance sera égale à la f.é.m. Les circuits à plusieurs sources de f.é.m. Lorsqu'un circuit possède uniquement une source de f.é.m. et des résistances, on peut remplacer le circuit complet par un circuit équivalent, avec une source de f.é.m.

et une résistance équivalente. Lorsque le circuit possède plusieurs sources, il faut utiliser les lois de Kirchhoff et obtenir un système d'équations qu'on pourra résoudre. La stratégie suivante donne la stratégie générale pour analyser des circuits quelconques qui sont composés de plusieurs résistances, de plusieurs sources de f.é.m. et même de condensateurs. 7.6 — Les circuits à plusieurs sources de f.é.m. STRATÉGIE 7.1 Les circuits et l'application des lois de Kirchhoff Illustrer la situation Dessinez le circuit. Si le sens des courants n'est pas donné, faites une hypothèse pour le sens du courant dans chaque branche. Identifiez les courants à l'aide de symboles. Décortiquer le problème Indiquez bien les quantités connues et les quantités inconnues. Identifier les clés La première clé est l'équation des nœuds : Pour un circuit ayant n nœuds, la loi des nœuds donne (n − 1) équations indépendantes. La deuxième clé est l'équation des mailles. Pour chaque maille indépendante, vous devez calculer les différences de potentiel, selon la méthode décrite à la section 7.2 : Résoudre le problème Vous obtenez un système d'équations, avec N inconnues et N équations, que vous pouvez résoudre par les méthodes habituelles. Si vous obtenez un courant négatif, cela indique que le courant réel est dans le sens opposé au sens choisi dans votre hypothèse. Valider la réponse Il est possible de vérifier la solution en remplaçant les valeurs obtenues dans les équations de la loi des mailles et de la loi des nœuds. Prenons par exemple le circuit de la figure 7.18, avec le sens des courants déjà choisi. Il y a deux nœuds (c et d). Pour le nœud c, selon la loi des nœuds, on a i1 + i 2 = i 3 . En ce qui a trait au nœud d, on obtient la même équation. On doit ensuite appliquer la loi des mailles. Pour la maille abcda, on a +E1 − R1i1 − E2 + R 2i2 = 0 . Pour la maille dcefd, la loi des mailles implique que : −R 2i2 + E2 − R 3i3 + E3 = 0 . On peut aussi considérer la maille abcefda, mais cette dernière n'est pas indépendante des deux autres.

Elle correspond à la somme des deux autres mailles. L'équation obtenue avec la maille abcefda n'apporte donc rien de plus que les équations qu'on a trouvées avec les deux autres mailles. Avec un nœud et deux mailles, on obtient trois équations indépendantes, ce qui permet de trouver trois inconnues. FIGURE 7.18 Un circuit à deux mailles 235 236 CHAPITRE 07 — Les circuits à courant continu EXEMPLE 7.5 Un circuit plus complexe Un circuit est constitué de trois sources de f.é.m. (E1 = 3,00 V, E2 = 4,40 V et E3 = 5,50 V) et de quatre résistances (R1 = 1,00 kΩ, R 2 = 2,30 kΩ, R3 = 1,70 kΩ et R4 = 0,800 kΩ), comme le montre la figure ci-contre. a. Calculez le courant qui circule dans chaque source de f.é.m.

b. Calculez la différence de potentiel V b − Va. SOLUTION Illustrer la situation Résoudre le problème À la figure 7.19, nous ajoutons au circuit les courants, incluant un sens. Ceci est une hypothèse. Afin de résoudre les équations, nous commençons par regrouper les termes et remplacer les valeurs. Pour simplifier, nous exprimons les résistances en kΩ, ce qui va donner des courants en mA. i1 = i 2 + i 3 (iv) 4, 40 − 2, 30i2 − 1,00i1 − 3,00 = 0 ⇒ 1,00i1 + 2,30i2 = 1,40 (v) 5,50 − 1,70i3 − 1,00i1 − 3,00 − 0,800i3 = 0 ⇒ 1,00i1 + 2,50i3 = 2,50 (vi) La variable i1 se retrouve dans les trois équations, alors que les variables i2 et i3 apparaissent seulement dans deux équations. Il est alors plus simple d'isoler i2 et i3 en fonction de i1. À partir de l'équation (v), FIGURE 7.19 Le circuit de l'exemple 7.5, avec le sens des courants (vii) Décortiquer le problème Selon l'équation (vi), (viii) Nous insérons ensuite les équations (vii) et (viii) dans l'équation (iv) pour obtenir une équation avec seulement l'inconnue i1 : SOLUTION a. Identifier les clés La première clé est la loi des nœuds. Dans le cas du nœud d, i 2 + i 3 = i1 . (i) 1,834 8i1 = 1,608 7 i1 = 0,876 8 mA = 877 μA .

(réponse) (ii) Nous trouvons les autres valeurs de courant en remplaçant la valeur de i1 dans les équations (vii) et (viii) : (iii) (réponse) Ensuite, la deuxième clé est la loi des mailles. Nous l'appliquons d'abord à la maille aedca : +E2 − R 2i2 − R1i1 − E1 = 0 . i1 = (0,608 7 − 0,434 8i1) + (1,00 − 0,400i1) Ensuite, pour la maille gbdcahg, nous obtenons E3 − R 3i3 − R1i1 − E1 − R4i3 = 0 . 7.7 — Les circuits RC (réponse) Valider la réponse Les valeurs positives que nous avons obtenues indiquent que l'hypothèse pour le sens des courants est correcte.

Le courant i1 circule de la borne + à la borne − dans E1, alors que les deux autres courants circulent de la borne − vers la borne + dans E2 et E3 respectivement. 237 n'importe quel parcours entre les deux points. Nous optons pour le parcours ahgb : Va − R4i3 + E3 = V b ⇒ V b − Va = E3 − R4i3 . (ix) Résoudre le problème En tenant compte des résultats trouvés à la partie a., nous obtenons (réponse) SOLUTION b. Identifier la clé Valider la réponse La clé consiste à additionner les différences de potentiel, du point a au point b. Nous pouvons choisir Le point b a un potentiel plus élevé, selon le résultat obtenu. 7.7 Les circuits RC Dans les circuits que nous avons étudiés jusqu'à présent dans ce chapitre, le courant est constant, il ne varie pas dans le temps.

Cette situation se produit dans le cas de résistances qui sont branchées à des piles. Quand un condensateur fait partie du circuit, le courant change en fonction du temps. Lorsque le condensateur n'a pas de charge, le courant est important, alors que lorsque le condensateur est chargé complètement, il n'y a plus de courant dans la branche du condensateur. Nous allons maintenant analyser le circuit possédant un condensateur en régime transitoire, c'est-à-dire entre le moment où le condensateur est complètement déchargé et le moment où il est complètement chargé. La décharge d'un condensateur Le circuit de la figure 7.20a est constitué d'un condensateur, dont la capacité est C et la charge initiale est Qm, branché à une résistance R et à un interrupteur. À t = 0, on ferme l'interrupteur, ce qui permet aux électrons de l'armature négative de se déplacer vers l'armature positive, en passant par la résistance. Ceci produit un courant i dans le circuit.

À mesure que la charge du condensateur diminue, le courant diminue aussi.

Pour connaître la charge du condensateur et le courant dans le circuit en fonction du temps, on applique la loi des mailles au circuit de la figure 7.20b, pour la maille abcda : (a) (7.24) Dans cette équation, Q et i sont les valeurs instantanées de la charge du condensateur et du courant dans la résistance. On sait que le courant correspond au taux de variation de la charge. Dans le présent cas, la charge du condensateur diminue (dQ/ dt < 0). Par conséquent, puisque le courant i est une valeur positive, (7.25) (b) FIGURE 7.20 Un circuit RC : (a) avant la fermeture ; (b) après la fermeture de l'interrupteur 238 CHAPITRE 07 — Les circuits à courant continu On peut écrire l'équation 7.24 en fonction de la charge Q et des propriétés du circuit : (7.26) Il s'agit d'une équation différentielle du premier ordre. Pour résoudre cette équation, on place les termes qui dépendent de Q dans le membre gauche de l'équation et les autres termes dans le membre droit : Ici, RC est une constante qui dépend des caractéristiques du circuit. On intègre chacun des membres de l'équation : où K est une constante d'intégration. Pour isoler Q, on calcule la fonction exponentielle (l'inverse de ln) pour chaque membre de la dernière équation : (7.27) où K′ = e K est une autre constante. Cette constante doit être déterminée à partir des conditions initiales. Comme Q = Qm à t = 0, on trouve K′ = Qm, et la charge du condensateur en fonction du temps est (7.28) Le paramètre RC est exprimé en unités de temps, car un exposant ne peut pas avoir d'unité. Ce paramètre est la constante de temps τ du circuit : (7.29) L'équation 7.28 s'écrit alors Charge d'un circuit RC (décharge) (7.30) On calcule le courant en fonction du temps en remplaçant l'équation 7.28 dans l'équation 7.25 : Le facteur qui multiplie la fonction exponentielle correspond au courant initial dans le circuit, car Qm /C = ΔVm est la différence de potentiel initiale aux bornes du condensateur. Le courant circulant dans la résistance en fonction du temps est Courant dans un circuit RC (décharge) (7.31) La figure 7.21 illustre la charge du condensateur et le courant en fonction du temps. Les deux fonctions sont des exponentielles décroissantes. À t = 0, la 7.7 — Les circuits RC charge et le courant sont maximaux. Ensuite, ils diminuent de façon exponentielle et tendent vers zéro lorsque t → ∞. Après t = τ, la charge est Q = Qm /e, ce qui représente environ 37 % de la charge initiale. Plus la constante de temps est faible, plus le condensateur se décharge rapidement. Si la résistance est faible, le courant initial est élevé, ce qui décharge rapidement le condensateur. C'est le cas par exemple quand un condensateur est branché au flash d'un appareil photo. De même, si la capacité est faible, le condensateur n'a pas une grande charge au départ, et celle-ci diminue rapidement lorsque le courant circule dans le circuit. FIGURE 7.21 Pour un circuit RC avec un condensateur qui se décharge. (b) (a) (a) la charge du condensateur en fonction du temps ; (b) le courant dans la résistance en fonction du temps REMARQUE Mathématiquement, le condensateur a besoin d'un temps infini pour se décharger complètement. Dans la pratique, après un temps t = 5τ, la charge du condensateur représente moins de 1 % de la charge initiale ; le condensateur peut être considéré comme un condensateur déchargé. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 7.5 Le tableau suivant présente les données de trois circuits RC différents. Classez les circuits par ordre croissant du temps pour que la charge du condensateur atteigne 50 % de sa valeur initiale. Circuit 1 Circuit 2 Circuit 3 Qm (μC) 2 4 8 R (kΩ) 10 5 3 C (μF) 1 2 3 La Charge d'un condensateur Pour charger un condensateur, on le branche à une source de f.é.m. et à une résistance, comme dans le circuit de la figure 7.22a (voir la page suivante). Lorsque t < 0, l'interrupteur est ouvert, et la charge du condensateur est nulle. On ferme l'interrupteur à t = 0.

La f.é.m. de la pile produit un champ électrique dans le circuit, et les électrons se déplacent de l'armature supérieure du condensateur vers l'armature inférieure, en passant par la source de f.é.m. et la 239 240 CHAPITRE 07 — Les circuits à courant continu résistance. La charge du condensateur augmente graduellement. La figure 7.22b montre la situation pour t > 0, lorsque la charge du condensateur est Q et que le courant dans le circuit est I. (a) Lorsque t → ∞, le condensateur est complètement chargé, et aucun courant ne circule dans le circuit ; la différence de potentiel aux bornes du condensateur est égale à la f.é.m. (ΔVC = ΔVm = E), et la charge du condensateur est maximale (Q = Qm = C ΔVm = CE). (b) Pour obtenir la charge Q et le courant i en fonction du temps, on applique la loi des mailles, pour la maille abcda dans le cas intermédiaire de la figure 7.22b : (7.32) (b) Le potentiel diminue lorsqu'on traverse le condensateur, car on va de l'armature positive à l'armature négative. Cette fois-ci, la charge du condensateur augmente. Ainsi, (7.33) En insérant l'équation 7.33 dans l'équation 7.32, on obtient une équation différentielle du premier ordre : (c) (7.34) FIGURE 7.22 Un circuit RC avec une source de f.é.m. : (a) avant la fermeture ; (b) après la fermeture de l'interrupteur ; (c) pour t → ∞. (7.35) Pour résoudre cette équation, on fait un changement de variable afin d'obtenir une forme semblable à l'équation 7.26. Si on pose X = Q − CE (ce qui implique que dX/dt = dQ/dt), on arrive à l'équation (7.36) Cette équation est identique à l'équation 7.26, à cela près que Q est remplacée par X. La solution est donc par l'équation 7.27, en remplaçant Q par X : où τ = RC est la constante de temps du circuit et K′, une constante d'intégration qu'on doit déterminer à l'aide des données initiales.

On peut réinsérer la charge Q dans l'équation : À t = 0, la charge du condensateur est nulle.

En insérant cette donnée dans l'équation précédente, on obtient 0 = CE + K′ ⇒ K′ = − CE . La charge du condensateur en fonction du temps est donc Charge dans un circuit RC (condensateur qui se charge) (7.37) 7.7 — Les circuits RC La figure 7.23a illustre la charge en fonction du temps. La charge initiale est nulle et pour t → ∞, la charge est Q = Qm = CE.

Après un temps t = τ, la charge est Q = CE(1 − 1/e), ce qui représente environ 63 % de la charge maximale. On trouve le courant qui circule dans la résistance et la source de f.é.m. en dérivant la charge : Défi animé 7.3 Dans le cas d'un circuit RC, pouvez-vous prédire l'allure de la différence de potentiel aux bornes de la résistance et du condensateur pendant que ce dernier se charge ? (7.38) C'est la même expression que dans le cas du circuit RC avec un condensateur qui se décharge. À t = 0, le courant est i = im = E/R, ce qui représente le courant maximal.

Le courant en fonction du temps est illustré à la figure 7.23b, et il est donné par : (7.39) (a) (b) FIGURE 7.23 Pour un circuit RC avec un condensateur qui se charge : (a) la charge en fonction du temps ; (b) le courant en fonction du temps. REMARQUE Les équations obtenues sont valables quand le circuit RC possède un condensateur et une résistance. Lorsqu'il y a plusieurs résistances ou plusieurs condensateurs, il est souvent possible de réduire le circuit à un circuit équivalent, avec une seule résistance et un seul condensateur. Les équations précédentes peuvent alors être utilisées dans ce circuit équivalent. EXEMPLE 7.6 Un stimulateur cardiaque La figure ci-contre montre le circuit d'un stimulateur cardiaque semblable à celui de la photo en début de chapitre. Le circuit est constitué d'une pile (E = 3,50 V), d'une résistance R, d'un condensateur C et d'un interrupteur contrôlé par un système électronique, le tout complété par le cœur, dont la résistance est de 520 Ω.

Lorsque l'interrupteur est ouvert, le condensateur doit acquérir 95,0 % de sa charge maximale en 0,300 s (le temps entre deux battements). Lorsque l'interrupteur est fermé, le condensateur doit se décharger avec une constante de temps de 0,500 ms à travers le cœur, pour que le cœur reçoive très rapidement l'énergie électrique. Calculez les valeurs de R et de C nécessaires. Courant dans un circuit RC (condensateur qui se charge) 241 242 CHAPITRE 07 — Les circuits à courant continu Pour le circuit (b), la constante de temps est donnée par l'équation 7.29 : SOLUTION Illustrer la situation Lorsque l'interrupteur est ouvert, le circuit est celui de la figure 7.24a, avec deux résistances en série. Lorsque l'interrupteur est fermé, tout le courant va passer par l'interrupteur ; on peut enlever la branche contenant la pile sans rien changer, comme à la figure 7.24b.

τ(b) = RcœurC .

(ii) Résoudre le problème Nous pouvons d'abord calculer C à l'aide de l'équation (ii). Nous obtenons (réponse) Pour trouver la valeur de la résistance R, nous isolons d'abord Réq dans l'équation (i) : (a) (b) FIGURE 7.24 Le circuit équivalent : (a) lorsque l'interrupteur est ouvert ; (b) lorsque l'interrupteur est fermé. Décortiquer le problème Nous ajoutons un indice (a) pour spécifier les données durant la charge et un indice (b) pour indiquer les données durant la décharge du condensateur. La résistance R est donc (réponse) Identifier les clés Pour le circuit (a), la charge du condensateur est donnée par l'équation 7.37 : (i) où Réq = R + Rcœur, car les résistances sont en série. Valider la réponse La résistance du stimulateur cardiaque est beaucoup plus grande que la résistance du cœur. Le courant qui circule dans le cœur durant la charge du condensateur est donc très faible : im = E/R éq = 34 μA. RÉSUMÉ QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 243 RÉSUMÉ Dans ce chapitre, nous avons analysé les circuits à l'aide des lois de Kirchhoff, qui sont des règles générales s'appliquant aux circuits.

LES LOIS ET LES PRINCIPES • Un nœud est un point où des conducteurs se rencontrent. Selon la loi des nœuds, • La différence de potentiel dans un dispositif dépend du sens utilisé : • Une maille est un parcours fermé dans un circuit. Selon la loi des mailles, LES RÉSULTATS LES APPLICATIONS • Les résistances en série : Réq = R1 + R2 + · · · i1 = i 2 = i . Un circuit RC comprend un condensateur et une résistance. • La constante de temps est τ = RC . • Lorsqu'un condensateur résistance, • Les résistances en parallèle : se décharge dans une • Lorsqu'un condensateur est chargé par une source de f.é.m. en série avec une résistance, 244 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Q questions qualitatives • E exercices simples • P problèmes • solution disponible Section 7.2 Les lois de Kirchhoff Q1 Combien de nœuds et de mailles indépendantes y a-t-il dans les circuits suivants ? a. b. FIGURE 7.26 • Question 3 FIGURE 7.27 • Exercice 4 E5 Dans le circuit de la figure 7.28, E1 = 120 V, R1 = 75,0 Ω et R 2 = 36,0 Ω. a. Quel est le courant dans le circuit ? b. Quelle est la différence de potentiel aux bornes de chaque résistance ? c. Quelle est la puissance dissipée par chaque résistance ? Q2 La figure 7.25 montre une partie d'un circuit. Quel est le courant dans la branche verticale ? Indiquez aussi son sens.

FIGURE 7.28 • Exercice 5 E6 La figure 7.29 montre une partie d'un circuit. Dans ce circuit, E = 5,00 V, R1 = 250 Ω, R 2 = 125 Ω, i1 = 12,0 mA et i2 = 6,00 mA. a. Quel est le courant i 3 et quel est son sens ? FIGURE 7.25 • Question 2 b.

Calculez la différence de potentiel V b − Va. Q3 Pour le circuit de la figure 7.26, écrivez les équations de Kirchhoff : a. pour le nœud c ; b. pour la maille abca ; c. pour la maille cdac. FIGURE 7.29 • Exercice 6 E4 Dans le circuit de la figure 7.27, E1 = 12,0 V, E2 = 15,0 V, R1 = 3,00 Ω, R 2 = 25,0 Ω et R 3 = 60,0 Ω. Déterminez le courant qui circule dans la maille et indiquez son sens. P7 Dans le circuit de la figure 7.30, E = 11,5 V, C1 = 32,0 μF, C2 = 64,0 μF, R1 = 320 Ω, R2 = 160 Ω, R3 = 160 Ω et R4 = 320 Ω. QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES a. À un instant donné, le courant dans la résistance R1 est de 15,0 mA. Quelle est la charge sur le condensateur C 1 à cet instant ? b. À autre instant, la charge sur le condensateur C 2 est la même que la charge calculée en a. Quel est alors le courant dans la résistance R 2 et le courant dans la résistance R 4 ? 245 E11 Une batterie réelle a une f.é.m. de 12,0 V. Elle est bran- chée à une résistance de 1,50 Ω.

La résistance dissipe une puissance de 60,0 W. Quelle est la valeur de la résistance interne de la batterie ? E12 Une batterie ayant une f.é.m. de 6,00 V a une résis- tance interne de 0,800 Ω.

On la branche à une résistance R = 2,50 Ω. a. Quelle est la puissance produite par les réactions chimiques de la batterie ? b. Quelle est la puissance dissipée à l'intérieur de la batterie ? c. Quelle est la puissance nette fournie par la batterie à la résistance R ? FIGURE 7.30 • Problème 7 E13 Pour connaître la résistance interne r d'une pile, dont P8 Un pont de Wheatstone est un montage permettant de mesurer une résistance inconnue R x à partir de la valeur connue de trois autres résistances (voir la figure 7.31). La résistance R 2 est une résistance variable, et l'appareil au centre est un galvanomètre (très sensible).

On change la valeur de R 2 jusqu'à ce que le galvanomètre indique un courant nul, ce qui signifie que V b = Va. Montrez que la valeur de R x est alors donnée par : la f.é.m. est E, on la branche en série à une résistance R (voir la figure 7.33). Un voltmètre est branché à la résistance, et il affiche une différence de potentiel ΔV R. Trouvez une expression algébrique pour r. FIGURE 7.33 • Exercice 13 P14 Une pile réelle a une f.é.m. E et une résistance interne r. Elle est reliée à une résistance variable R. a. Démontrez que la puissance dissipée par la résistance variable est maximale lorsque R = r.

(Indice : Vous avez besoin de calculer une dérivée.) FIGURE 7.31 • Problème 8 b. Quelle est la puissance maximale dissipée dans la résistance ?

Section 7.3 Les piles réelles P15 Une pile de 1,45 V a une résistance interne de 0,350 Ω.

Q9 La figure 7.32 montre trois situations où la même pile réelle est utilisée dans un circuit (qui n'est pas complètement illustré). Classez les situations par ordre croissant de la différence de potentiel ΔV = V b − Va. On branche à une résistance R, de telle sorte que cette dernière dissipe une puissance de 1.25 W. Quelle est la valeur de R? P16 Lorsqu'une cellule photovoltaïque est branchée à une résistance de 250 Ω, elle fournit un courant de 1,21 mA. Lorsqu'on la branche à une résistance de 500 Ω, elle fournit un courant de 0,840 mA. Déterminez la f.é.m. et la résistance interne de la cellule photovoltaïque. Section 7.4 L'association de résistances (i) (ii) (iii) Q17 Pour les circuits suivants, indiquez si les résistances sont en série ou en parallèle. FIGURE 7.32 • Question 9 E10 Une pile réelle a une f.é.m. de 1,50 V. Lorsqu'on la branche à une résistance de 2,50 Ω, la différence de potentiel aux bornes de la pile est de 1,20 V. Quelle est la résistance interne de la pile ? a. b. c. 246 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Q18 Une ampoule de 60 W et une ampoule de 100 W sont conçues pour être utilisées dans un circuit en parallèle, branché à une source de f.é.m. de 120 V. a. Quelle ampoule a la plus petite résistance ? b. Si on branche les deux ampoules en série à une source de f.é.m. de 120 V, laquelle éclairera le plus ? a. b. c. d. e. f. Q19 Les circuits de la figure 7.34 sont constitués de résis- tances identiques R. Classez les circuits par ordre croissant de leur résistance équivalente. (i) (ii) E23 Soit le circuit de la figure 7.36, où R1 = 5,0 kΩ, (iii) (iv) (v) (vi) FIGURE 7.34 • Question 19 E20 Une guirlande lumineuse est composée de 25 ampoules identiques branchées en série. Chaque ampoule dissipe une puissance de 13 W lorsque la guirlande est branchée dans une prise de 120 V. R 2 = 4,0 kΩ, R 3 = 8,0 kΩ et R4 = 1,0 kΩ.

a. Quel est le courant dans la guirlande ? b. Quelle est la résistance de chaque ampoule ?

Le courant dans la résistance R 3 est de 0,050 mA. Quelle est la f.é.m. de la source ? FIGURE 7.36 • Exercice 23 P24 Dans le circuit de la figure 7.37, Ro est une valeur connue. Quelle est la valeur de la résistance équivalente entre les points a et b qui soit Réq = Ro ? a. Quelle est la différence de potentiel aux bornes d'une ampoule ? b. Quelle est la résistance de chaque ampoule ?

c. Quel est le courant qui circule dans une ampoule ? d. Quel est le courant fourni par la prise de courant ? E21 Dans le circuit de la figure 7.35, E = 24,0 V, R1 = 124 Ω R 2 = 210 Ω, R 3 = 144 Ω et R4 = 1,08 kΩ. Quelle est la puissance fournie par la source de f.é.m. ? FIGURE 7.37 • Problème 24 P25 Dans le circuit de la figure 7.38, E = 6,00 V, R1 = 50,0 Ω, R 2 = 120 Ω, R 3 = 190 Ω et R 4 = 20,0 Ω. a. Calculez la puissance fournie par la pile et la différence de potentiel V b −Va lorsque l'interrupteur est ouvert. b. Calculez la puissance fournie par la pile et la différence de potentiel V b −Va lorsque l'interrupteur est fermé. FIGURE 7.35 • Exercice 21 E22 Trouvez la résistance équivalente entre les points a et b dans les circuits suivants. FIGURE 7.38 • Problème 25 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 247 P26 Dans le circuit de la figure 7.39, E = 12,0 V, E30 On veut mesurer la différence de potentiel aux bornes de la résistance R 2 dans le circuit de la figure 7.42, où R1 = 12,0 kΩ, R2 = 7,50 kΩ, R 3 = 2,40 kΩ, R 4 = 53,0 kΩ et R 5 = 82,00 Ω. Calculez le courant dans chacune des résistances et la puissance totale fournie par la pile. (a) (b) a. Calculez la différence de po- tentiel aux bornes de chaque résistance et la charge de chaque condensateur. FIGURE 7.39 • Problème 26 a. Quelle est la puissance dissipée par la résistance R 2 ? b. Quelle est la différence de potentiel aux bornes de la résistance R 2 ? FIGURE 7.42 , où E = 30,0 V, R1 = 500 kΩ et R 2 = 1,80 MΩ.

On utilise un voltmètre ayant une résistance interne de 10,0 MΩ. a. Quelle est la différence de potentiel ΔVréel aux bornes de R 2 avant de brancher l'appareil ? b. Quelle est la valeur affichée ΔVmes par le voltmètre lorsqu'on le branche aux bornes de R 2 ?

c. Calculez l'erreur relative causée par l'appareil : FIGURE 7.39 • Problème 26 P27 Dans le circuit de la figure 7.40, R1 = 10,0 Ω, R 2 = 4,00 Ω et la résistance R est une résistance variable (ce qui est indiqué par une flèche sur la résistance dans la figure). Quelle est la puissance dissipée dans la résistance R ? de 960 Ω soumise à une différence de potentiel de 110 V. On utilise un ampèremètre dont la résistance interne est de 5,00 Ω. Quelle erreur relative l'instrument de mesure produit-il si la différence de potentiel aux bornes de la résistance demeure constante ?

c. Pour quelle valeur de R la puissance dissipée dans celle-ci sera-t-elle maximale ? Section 7.6 Les circuits à plusieurs sources de f.é.m. a. Quel est le courant dans la résistance R ? E32 Dans le circuit de la figure 7.43, E1 = 1,5 V, E2 = 9,0 V, E3 = 6,0 V, R1 = 15 Ω, R 2 = 180 Ω, R 3 = 62 Ω et R 4 = 120 Ω. Déterminez le courant qui circule dans chacune des sources de f.é.m., en indiquant aussi le sens du courant. FIGURE 7.40 • Problème 27 Section 7.5 Les instruments de mesure Q28 Classez par ordre croissant la lecture des voltmètres de la figure 7.41. FIGURE 7.43 • Exercice 32 P33 La batterie de votre voiture étant déchargée, vous c. Calculez l'erreur relative de l'ampèremètre : ne pouvez plus démarrer. La f.é.m. est de 9,800 V, et sa résistance interne est de 0,980 V. Vous demandez à un ami de vous aider à recharger votre batterie en utilisant des câbles de démarrage et la batterie de son automobile (ce qu'on appelle à tort, dans le langage courant, un « survoltage » ou un « boostage » de batterie). La batterie de votre ami a une f.é.m. de 12,0 V et une résistance interne de 0,005 00 Ω. Le circuit est présenté à la figure 7.44. Quel est le courant dans le démarreur lorsque vous fermez l'interrupteur, si la résistance de votre démarreur est de 0,023 0 Ω ? FIGURE 7.42 • Exercices 29 et 30 FIGURE 7.44 • Problème 33 FIGURE 7.41 • Question 28 E29 On veut mesurer le courant dans le circuit de la fi- gure 7.42, où E = 3,00 V, R1 = 200 Ω et R 2 = 500 Ω.

On utilise un ampèremètre dont la résistance interne est r = 20 Ω. a. Quel est le courant iréel dans le circuit sans ampèremètre ? b. Quel est le courant affiché imes par l'ampèremètre ? 248 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES P34 Dans le circuit de la figure 7.45, E1 = 12,0 V, P37 Le circuit de la figure 7.48 possède trois sources a. Quel est le courant qui circule dans l'ampèremètre ? Indiquez aussi son sens. ayant des f.é.m. inconnues (indiquées par des cercles) et les résistances R1 = 1 330 Ω, R 2 = 454 Ω et R 3 = 894 Ω. On mesure que Vb − Va = 2,00 V, i1 = 4,51 mA et i2 = 2,00 mA. a. Calculez la différence de potentiel V b − Va. a. le courant i 3 ; E2 = 17,0 V, E3 = 8,00 V, R1 = 2,00 kΩ, R 2 = 4,00 kΩ, R 3 = 3,00 kΩ et R 4 = 5,00 kΩ. b. la différence de potentiel V b − Vc ; c. la différence de potentiel V b − Vd ; d. la différence de potentiel V b − Vf. FIGURE 7.45 • Problème 34 P35 Dans le circuit de la figure 7.46, E1 = 6,00 V, E2 = 2,00 V et E3 = 4,00 V. Les résistances R = 3,00 Ω sont identiques. Les résistances internes des sources de f.é.m. n'est pas négligeable, mais elle est égale à r = 1,00 Ω. FIGURE 7.48 • Problème 37 a. Quelle est la valeur et le sens des courants qui circulent dans les sources de f.é.m. ? P38 Dans le circuit de la figure 7.49, E1 = 9,00 V, E2 = b. Pour chaque source de f.é.m., calculez la différence de potentiel à leurs bornes, c'est-à-dire V+ − V−. 6,00 V, R1 = 100 Ω, R 2 = 133 Ω et R 3 = 200 Ω. La puissance dissipée dans chaque résistance ne peut dépasser 0,500 W. La résistance R3 va-t-elle surchauffer ? FIGURE 7.46 • Problème 35 FIGURE 7.49 • Problème 38 Section 7.7 Les circuits RC Q40 On branche en série une pile, une ampoule lumi- neuse, un interrupteur et un condensateur. Initialement, le condensateur n'est pas chargé. On ferme l'interrupteur à t = 0. Comment évolue l'intensité de la lumière émise par l'ampoule ? 249 a. Quelle est la différence de potentiel aux bornes de la résistance après une constante de temps ? c. Quelle sera l'énergie emmagasinée dans le condensateur ?

b. Quelle est la différence de potentiel aux bornes de la résistance après une constante de temps ? b. Quelle est la charge du condensateur à t = 5,0 s ?

Q41 La figure 7.51 montre trois circuits RC. Les circuits sont composés de dispositifs identiques. On ferme les interrupteurs en même temps. Classez les circuits selon leur constante : a. de la constante de temps ; b. de la charge maximale sur le condensateur ; c. du courant maximal dans la branche du condensateur.

FIGURE 7.53 • Exercices 44 et 45 E45 Dans le circuit de la figure 7.53, E = 15,0 V, R = 7,00 kΩ et C = 12,0 μF.

On ferme l'interrupteur à t = 0. À quel temps le courant est-il égal à 80 % du courant maximal ? E46 Dans un circuit RC qui se décharge, la constante de (i) (ii) (iii) FIGURE 7.51 • Question 41 Q42 La figure 7.52 illustre le graphique de la charge en fonction du temps pour quatre situations différentes où un condensateur C se décharge dans une résistance. La capacité du condensateur est la même dans chaque cas. Classez les situations par ordre croissant selon : a. la constante de temps du circuit ; b. la résistance du circuit ; c. le courant initial. temps est égale à 60,0 ms. Déterminez le temps nécessaire pour que : a. la charge diminue de moitié ; b. l'énergie emmagasinée diminue de moitié.

E47 L'énergie potentielle emmagasinée dans un condensa- teur est de 2,50 μF est de 0,120 J. On branche le condensateur à une résistance de 1,50 MΩ à t = 0. a. Quelle est la constante de temps du circuit ? b.

Quelle est la charge initiale sur le condensateur ? c. Quel est le courant dans la résistance à t = 5,00 s après le branchement ? E48 Une pile ayant une f.é.m. E est reliée à un interrup- teur, à un condensateur de capacité C et à une résistance R (voir la figure 7.54). La résistance peut être changée (ce qui est indiqué par une flèche dans la figure). Lorsqu'on ouvre l'interrupteur, le condensateur se décharge dans la résistance. a. Lorsqu'on ouvre l'interrupteur, combien de temps le condensateur prend-il pour que la différence de potentiel à ses bornes diminue de moitié ? FIGURE 7.52 • Question 42 E43 Vérifiez que les unités du produit RC sont bien des s. On ouvre le temps de demi- décharge, c'est-à-dire le temps pour que le condensateur perde la moitié de sa charge initiale, en fonction de la résistance. Quel type de graphique obtient-on ? secondes, à partir de la définition du ohm et de celle du farad. E44 Dans le circuit de la figure 7.53, E = 120 V, R = 200 kΩ et C = 50,0 μF. Le condensateur est complètement déchargé avant que l'interrupteur soit fermé. À t = 0, on ferme l'interrupteur. FIGURE 7.54 • Exercice 48 250 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES P49 Un condensateur de 2,75 μF possédant une charge initiale de 12,2 μC est relié à un circuit, comme l'illustre la figure 7.55. Dans ce circuit, R1 = 4,00 kΩ, R 2 = 5,00 kΩ, R 3 = 6,75 kΩ et R 4 = 7,35 kΩ. On ferme l'interrupteur à t = 0. a. Déterminez le courant dans chaque résistance juste après la fermeture de l'interrupteur. b. Déterminez le courant dans chaque résistance pour t → ∞. a. Quelle est la charge du condensateur à t = 3,70 ms ?

b. Quel est le courant qui circule dans la résistance R 2 à t = 3,70 ms ? c. À quel temps la charge du condensateur est-elle égale à Q = 1,22 μC ? FIGURE 7.57 • Problème 51 P52 Un circuit RC est constitué d'un condensateur C et d'une résistance R branchés en série à une source de f.é.m. E. À t = 0, la charge du condensateur est nulle.

FIGURE 7.55 • Problème 49 P50 Dans le circuit de la figure 7.56, les trois condensateurs sont identiques et ils ont une capacité de 10 μF. Ils n'ont pas de charge initiale. Les quatre résistances sont identiques, avec une résistance de 450 Ω chacune. La source 1 a une f.é.m. de 800 V, et la source 2, une f.é.m. de 400 V. a. Quelle est l'énergie emmagasinée dans le condensateur lorsque celui-ci est complètement chargé ? b. Quelle est l'énergie fournie par la pile durant la charge du condensateur ? c. Montrez que la moitié de l'énergie fournie par la pile est dissipée dans la résistance. P53 Dans le circuit de la figure 7.58, E = 12,0 V, et la pile est idéale. Le condensateur est initialement déchargé. On ferme l'interrupteur à t = 0. Quelle est la valeur de la résistance R1 tout juste après avoir fermé l'interrupteur ? R1 = 60,0 kΩ, R 2 = 20,0 kΩ, R 3 = 15,00 kΩ, R 4 = 50,0 kΩ et C = 2,70 μC. b. Quelle est la charge du condensateur C 3 lorsque le régime permanent est atteint, c'est-à-dire lorsque les condensateurs sont complètement chargés ?

a. Après avoir fermé l'interrupteur, quelle est la charge maximale portée par l'armature positive du condensateur ? b. Quelle est l'armature positive ? c. Une fois le condensateur chargé, on ouvre l'interrupteur. Quelle est la constante de temps de décharge du condensateur ? FIGURE 7.56 • Problème 50 P51 Soit le circuit de la figure 7.57, où E = 120 V, R1 = R 2 = R 3 = 730 Ω et C = 6,50 μF. La charge du condensateur est nulle avant la fermeture de l'interrupteur.

À t = 0, on ferme ce dernier. FIGURE 7.58 • Problème 53 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 251 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 7.1 V b − Va = 1,0 V Selon la loi des mailles, la somme des différences de potentiel d'une maille donne zéro. Si on part de la borne négative de la pile, en sens horaire, on a une augmentation du potentiel de 1,5 V dans la pile, puis une diminution de 0,5 V dans la résistance (selon le sens du courant). Il y a donc une augmentation de 1,0 V dans le dispositif inconnu. 7.2 i diminue. Lorsqu'on ferme l'interrupteur, le courant dans la pile est 5i′ augmente pendant que le courant diminue.

7.3 a. i1 = i2 = i3 Le courant est le même pour les résistances en série. Il n'y a pas de nœud pour que le courant se divise.

b. ΔV1 < ΔV2 < ΔV3 La différence de potentiel aux bornes d'une résistance est ΔV = Ri. Le courant est le même, donc la plus faible résistance a la plus faible différence de potentiel. c. P1 < P2 < P 3 On peut calculer la puissance par une résistance à l'aide de l'équation P = Ri 2. Comme le courant est le même, c'est la plus faible résistance qui dissipe le moins de puissance. 7.4 P 3 > P4 < P2 < P 1 La puissance dissipée est P = Ri 2. Les résistances étant identiques, c'est le courant qui permet de savoir laquelle dissipe la plus petite puissance. Les résistances R 3 et R 4 sont en série. Elles sont parcourues par un même courant, donc elles dissipent la même puissance. La branche contenant ces deux résistances est en parallèle avec la branche de la résistance R 2. Le courant est plus élevé dans la résistance R 2, car celle-ci est plus faible que la résistance équivalente de R 3 et de R 4. Finalement, le courant est plus grand dans R1 selon la loi des nœuds i1 = i2 + i3, donc la résistance R1 dissipe la plus grande puissance. 7.5 t 3 < t 1 < t 2 Le temps de décharge est rapide si τ = RC est faible. Dans le tableau, τ1 = t2 = 10 ms et τ3 = 9 ms. Chapitre 252 Le champ magnétique Buts du chapitre Dans ce chapitre, on présente et on calcule le champ magnétique produit par des courants électriques. Après l'étude de ce chapitre, vous serez en mesure : • de définir la notion de champ magnétique ; • de calculer le champ magnétique de certaines configurations de courants électriques à l'aide de la loi de Biot-Savart ; • de calculer le champ magnétique de configurations symétriques de courants électriques à l'aide du théorème d'Ampère ; • de calculer le champ magnétique d'un dipôle magnétique. Préalables Ce chapitre porte sur la façon de calculer le champ magnétique. Revoyez : • la notion de champ, présentée à la section 2.1 ; • le champ électrique pour une distribution continue, analysé à la section 2.3 ; • les dipôles électriques, étudiés à la section 2.3 ; • la symétrie et le théorème de Gauss, présentés aux sections 3.1, 3.3 et 3.4 ; • le produit vectoriel, expliqué à la section 2.5 du tome 1. 253 ATLAS est l'un des détecteurs de particules du Grand collisionneur de hadrons (LHC), en Suisse. Les aimants toroïdaux (les gros cylindres) qui le composent permettent d'approfondir nos connaissances de l'Univers. UN PEU D'HISTOIRE Le courant passe d'Ørsted à Ampère Pour être compris des savants européens, il a fallu attendre la parution de nombreux ouvrages scientifiques qui ont fait avancer la science européenne. En astronomie, Copernic est polonais, Galilée, italien et Kepler, allemand. En mécanique, Descartes est français, Huygens, néerlandais et Newton, anglais. L'histoire de l'électromagnétisme n'est pas une exception. Elle commence avec l'Anglais William Gilbert, qui signe la première étude scientifique de l'aimant en 1600, et elle se poursuit avec les expériences de l'Allemand Otto von Guericke, qui fabrique le premier générateur d'électricité statique en 1663. Au 18e siècle, Coulomb est français et Alessandro Volta, italien, mais Benjamin Franklin vient d'Amérique du Nord.

Au Moyen Âge, le latin était la langue de travail des universités et des lettres. À partir du 17e siècle, la science gagnant en popularité, des passionnés forment des sociétés pour discuter de leur sujet favori dans une langue vivante. Certains philosophes écrivent encore en latin, mais d'autres veulent communiquer avec le plus grand nombre. Galilée écrit donc en italien et Descartes, en français. Au 19e siècle, trois langues s'imposent en raison de l'importance des communautés scientifiques correspondantes : le français, l'anglais et l'allemand.

Cependant, la liste reste compris de nombreuses personnes éduquées. Fils d'apothicaire, Hans Christian Ørsted a grandi sur une petite île danoise. Malgré l'absence d'une école, il apprend l'allemand, le français, le grec et le latin tout Photo to come en s'initiant à la pharmacie. Il termine son éducation à l'Université de Copenhague en obtenant un doctorat à l'âge de 22 ans. La chimie l'intéresse. L'invention de la pile électrique lui donne l'occasion d'étudier les sels dissous, et cette expérience stimule son intérêt pour les phénomènes électriques. Depuis l'époque de Coulomb, quelques observations laissaient croire à un lien entre l'électricité et le magnétisme, mais Coulomb lui-même avait nié cette possibilité. En Europe du Nord, la philosophie dominante prône l'unité profonde des forces de la nature. Ørsted adhère à cette vision des choses. En 1820, il veut tester l'effet d'un courant électrique sur une aiguille aimantée devant un cours à l'université, mais il manque de temps. Du coup, ses étudiants assistent à sa première expérience. Ørsted n'en attend pas grand-chose, croyant qu'il faudra un courant assez intense pour chauffer le fil au rouge. La petite déflexion de l'aiguille n'impressionne pas ses étudiants, mais leur professeur comprend aussitôt qu'il vient de changer l'histoire de la physique. Ørsted répète les expériences avant de rédiger une lettre de quatre pages en latin à l'intention des savants de toute l'Europe. Pour le premier fois, ceux-ci ont sous les yeux une force qui produit un effet perpendiculaire à la ligne reliant deux corps. En France, le mathématicien André-Marie Ampère est surpris par la nouvelle. Fils d'un marchand de soie lyonnais guillotiné durant la Révolution française, il a consacré sa vie à la science. Galvanisé par la percée d'Ørsted, il enchaîne les expériences et formule neuf énoncés pour résumer ses constatations. Mieux, il propose une théorie générale qui ramène les phénomènes électriques et magnétiques à l'action de courants électriques.

À l'appui de sa nouvelle théorie électrodynamique, Ampère démontre qu'un solénoïde génère un champ magnétique et que deux fils parcourus par un courant électrique s'influencent mutuellement. Il en déduit aussi des conséquences : de la même façon qu'une aiguille aimantée réagit au passage du courant dans un fil ou une pile, la boussole pourrait réagir à la circulation de courants électriques à l'intérieur de la planète. Ce serait l'explication du géomagnétisme. Ampère formule une théorie si complète que les physiciens en oublient presque Ørsted : pourtant, la science n'aurait pas avancé sans la mise en commun de leurs efforts à tous les deux. Hans Christian Ørsted (1777-1851) 8.1 — Les aimants et le champ magnétique Après avoir étudié la force électrique qui s'exerce entre les particules chargées, nous commençons l'étude des phénomènes magnétiques dans le présent chapitre. Vous connaissez déjà sûrement les propriétés des aimants, qui servent à placer des notes sur le réfrigérateur ou pour garder fermée la porte d'une douche. La force magnétique est une autre force à distance. Comme pour la force électrique, il existe un champ, le champ magnétique, qui permet de décrire l'effet d'un aimant sur une autre à l'espace. Lorsque vous écoutez de la musique au moyen d'un baladeur MP3, les haut-parleurs de vos écouteurs fonctionnent grâce au champ magnétique, et l'information est stockée dans le lecteur à l'aide d'un champ magnétique. De même, les moteurs électriques utilisent la force magnétique pour convertir de l'énergie électrique en énergie cinétique. La résonance magnétique d'imagerie fait appel à des champs magnétiques très intenses à permis de développer l'imagerie par résonance magnétique, une méthode qui permet de voir à l'intérieur du corps humain. Les champs magnétiques intenses sont aussi nécessaires dans les détecteurs utilisés dans les accélérateurs de particules, comme c'est le cas pour le détecteur ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), qui est l'un des principaux détecteurs de particules du LHC (Large Hadron Collider), l'accélérateur de particules situé près de Genève en Suisse. Dans ce chapitre, nous allons étudier la façon de calculer le champ magnétique produit par des charges électriques en mouvement, c'est-à-dire des courants électriques. Nous utiliserons deux méthodes complémentaires, selon la configuration présentée. D'abord, nous appliquerons la loi de Biot-Savart, qui est l'équivalent de la loi de Coulomb en électrostatique, afin d'obtenir le champ magnétique en calculant une intégrale. Dans le cas de configurations symétriques, le théorème d'Ampère permet de calculer facilement le champ ma gnétique, comme le théorème de Gauss dans le cas du champ électrique. Nous étudierons à la fin du chapitre le champ magnétique produit par une boucle de courant, ce qui permettra de définir le dipôle magnétique. Nous analyserons la force magnétique en détail dans le chapitre 9 et verrons qu'un lien très important existe entre les phénomènes électriques et magnétiques au chapitre 10. 8.1 Les aimants et le champ magnétique Quelques expériences avec les aimants Au chapitre 1, nous avons commencé l'étude de la force électrique en réalisant quelques expériences simples avec des charges électriques. Nous procéderons de même pour la force magnétique, en utilisant des barreaux aimantés. Expérience 1 : On place un aimant sur un pivot pour que celui-ci puisse tourner librement autour d'un axe vertical.

L'aimant tourne et s'aligne approximativement dans une direction nord-sud. On appelle pôle nord magnétique de l'aimant la partie de l'aimant orientée vers le nord géographique (indiqué par la lettre N), et le pôle sud magnétique de l'aimant, la partie de l'aimant orientée vers le sud géographique (indiqué par la lettre S). 255 256 CHAPITRE 08 — Le champ magnétique Expérience 2 : (a) Lorsqu'on approche le pôle nord d'un aimant du pôle nord d'un autre aimant, les aimants se repoussent. (b) On obtient le même résultat lorsqu'on approche le pôle sud d'un aimant du pôle sud d'un autre aimant ; les aimants se repoussent. (c) Lorsqu'on approche le pôle nord d'un aimant du pôle sud d'un autre aimant, les aimants s'attirent. Expérience 3 : On coupe un aimant en deux. On n'obtient pas deux pôles isolés, mais deux aimants, chacun avec un pôle nord et un pôle sud. Expérience 4 : On approche une boussole d'un aimant. L'aiguille indiquant le nord est attirée par le pôle sud de l'aimant, alors qu'elle est repoussée par le pôle nord de l'aimant. De plus, l'aiguille est orientée dans la même direction que l'aimant lorsqu'on place la boussole à côté de l'aimant. Expérience 5 : On aimante attirer certains petits objets. Ces derniers sont attirés autant par le pôle nord que par le pôle sud de l'aimant. Les objets attirés sont composés de fer, de nickel ou de cobalt, ou d'un alliage de ces éléments. L'expérience 1 montre que les aimants permanents ont deux pôles et qu'un aimant se comporte comme un dipôle. L'expérience 2 révèle que la force magnétique est semblable à la force électrique : c'est une force à distance entre les pôles. Les pôles de même type se repoussent, tandis que les pôles de types différents s'attirent. L'expérience 3 met en évidence qu'on ne peut pas isoler un pôle magnétique. Un aimant contient nécessairement un pôle nord et un pôle sud. Certaines théories prévoient l'existence de monopôles magnétiques (uniquement un pôle nord ou un pôle sud), mais aucune expérience n'a permis de conclure qu'ils existaient réellement. L'expérience 4 montre qu'une boussole subit un moment de force lorsqu'elle est placée près d'un aimant. L'aiguille d'une boussole est un dipôle magnétique qui subit un moment de force produit par la force magnétique de l'aimant. L'expérience 5 révèle que la force magnétique agit sur des objets qui ne sont pas des aimants permanents. Ces objets sont attirés autant par le pôle nord que par le pôle sud d'un aimant. Pour la plupart des objets, la force magnétique n'est pas observable. Les objets doivent être composés de fer, de nickel ou de cobalt.

Ces éléments ont des propriétés particulières. Remarquez que dans le cas de la force électrique, un objet chargé produit une attraction sur un objet neutre, quelle que soit sa composition (la force étant plus intense pour un conducteur, mais un isolant subit aussi une attraction). Les objets attirés par les aimants sont aimantables. Lorsqu'ils sont près des aimants, ils deviennent des aimants temporaires ; ils peuvent attirer eux-mêmes de petits objets aimantables. Par contre, ils perdent leur aimantation rapidement lorsqu'on les éloigne de l'aimant permanent.

8.1 — Les aimants et le champ magnétique 257 Le champ magnétique Comme c'est le cas pour la force électrique, on introduit un champ comme médiateur de la force magnétique.

C'est le champ magnétique . Un aimant produit autour de lui un champ magnétique. Si on place un objet dans ce champ, il subit une force magnétique. Pour le visualiser, on trace les lignes de champ magnétique, de la même façon qu'on a tracé des lignes de champ électrique pour visualiser le champ électrique. Les lignes de champ magnétique ont les propriétés suivantes : • Le champ magnétique est tangent aux lignes de champ. • Le module du champ magnétique est proportionnel à la densité des lignes de champ : plus les lignes de champ sont rapprochées, plus le module du champ est élevé. • Les lignes de champ doivent sortir du pôle nord d'un aimant et se rendre jusqu'au pôle sud. • Les lignes de champ ne se croisent pas. Il est possible d'observer les lignes de champ en saupoudrant de la limaille de fer sur une feuille de papier placée sur un barreau aimanté (voir la figure 8.1). La limaille de fer va s'aligner sur les lignes de champ, comme une boussole. FIGURE 8.1 Les lignes de champ magnétique d'un barreau aimanté. On peut aussi obtenir l'orientation des lignes de champ magnétique à l'aide d'une boussole. L'aiguille de la boussole va s'orienter dans le sens du champ magnétique.

Les lignes de champ magnétique doivent continuer dans l'aimant, selon le résultat de l'expérience 3. En effet, à l'intérieur de l'aimant, il n'y a pas de monopôle magnétique où peuvent s'arrêter les lignes de champ, contrairement aux lignes de champ électrique qui commencent et se terminent aux charges électriques. La figure 8.2 montre les lignes de champ autour d'un barreau aimanté. On arrive au résultat important, valide pour n'importe quelle configuration de lignes de champ magnétique : FIGURE 8.1 La limaille de fer autour d'un aimant permet de rendre visibles les lignes de champ. Les lignes de champ magnétique forment des boucles fermées, car les monopôles magnétiques n'existent pas. Le champ magnétique terrestre Dans l'expérience 1, un aimant qui peut tourner librement sur un pivot s'oriente dans une direction approximativement nord-sud. L'aimant est donc une boussole. Cette rotation est causée par un moment de force magnétique produit par la Terre. En effet, la Terre produit un champ magnétique, qui ressemble beaucoup au champ d'un barreau aimanté (voir la figure 8.3 à la page suivante). Puisque les lignes de champ magnétique sont orientées vers le nord géographique, ceci signifie que le nord géographique de la Terre est un pôle sud magnétique. De même, le pôle nord magnétique de la Terre se trouve vers le sud géographique. Si on place un aimant pour qu'il puisse tourner selon un axe horizontal, il va s'orienter de telle sorte que le pôle nord de l'aimant sera orienté vers le sol lorsqu'on est dans l'hémisphère Nord, alors qu'il sera orienté vers le haut pour des points de l'hémisphère Sud de la Terre. L'inclinaison représente l'angle entre l'horizontale et l'aimant. Aux pôles magnétiques, l'aimant sera orienté de façon verticale, alors qu'il sera horizontal à l'équateur magnétique. FIGURE 8.2 Les lignes de champ magnétique autour d'un barreau aimanté Les lignes de champ sont toujours des boucles fermées. 258 CHAPITRE 08 — Le champ magnétique Les pôles magnétiques de la Terre ne coïncident pas exactement avec les pôles géographiques. Les randonneurs utilisant une carte topographique et une boussole doivent en tenir compte. La déclinaison est l'angle entre la direction indiquée par la boussole et la vraie direction nord-sud. Cette déclinaison varie selon la position sur la Terre. Les pôles magnétiques ne sont pas fixes, ils se déplacent lentement. La figure 8.4 montre le déplacement du pôle nord magnétique, situé en Antarctique, entre 1590 et 2010. FIGURE 8.3 FIGURE 8.4 Une simulation du champ magnétique terrestre.

Les lignes jaunes indiquent les lignes de champ qui s'éloignent de la Terre et les lignes bleues, des lignes de champ qui s'approchent de la Terre. Le déplacement du pôle nord magnétique entre 1590 et 2010. Le champ magnétique produit par un long fil Les propriétés magnétiques des aimants sont connues depuis l'Antiquité. On avait alors remarqué que certaines pierres de magnétite, composées d'un oxyde de fer, attiraient certains objets fabriqués en fer. Ces pierres étaient des aimants permanents. En 1820, le physicien danois Hans Christian Ørsted* (1777-1851) (voir la figure 8.5) a fait une découverte très importante durant un cours de physique : un courant électrique dans un fil produit un champ magnétique. La figure 8.6 illustre un long fil et des boussoles placées près du fil. Cette expérience montre qu'un courant électrique produit un champ magnétique perpendiculaire au nord géographique, comme le montre la figure 8.6a. Lorsqu'un courant i circule dans le fil, les aiguilles des boussoles changent d'orientation (voir la figure 8.6b). Les aiguilles s'orientent de manière à former un cercle autour du fil. Comme le montre la figure 8.6c, les lignes de champ magnétique produites par le fil est tangent à un cercle centré sur le fil. Le sens du champ est indiqué par la règle de la main droite : FIGURE 8.5 Hans Christian Ørsted (1777-1851), physicien danois Pour un long fil parcouru par un courant i, placez le pouce de votre main droite dans le sens du courant. Les doigts se referment autour du fil qui indique le sens du champ magnétique (a) (b) (c) FIGURE 8.6 (a) Lorsque le courant est nul, les boussoles indiquent le nord. (b) Pour un courant vers le haut, les aiguilles des boussoles sont tangentes à un cercle. (c) Les lignes de champ magnétique forment des cercles concentriques autour du fil. FIGURE 8.7 Dans l'exemple du fil, le courant est vers haut, et les lignes de champ magnétique sont vers la gauche. Il est plus difficile de tracer correctement les situations à trois dimensions sur une feuille de papier. Nous allons donc utiliser des schémas en deux dimensions, en ajoutant les vecteurs perpendiculaires au plan de la feuille avec les symboles illustrés à la figure 8.7 : pour un vecteur qui sort de la page, on utilise un point (la pointe de la flèche) et pour un vecteur qui entre dans la page, on utilise une croix (comme les plumes d'une flèche). Conformément à cette convention, on indique les sens du courant et du champ magnétique pour un courant perpendiculaire à la page, c'est-à-dire pour un courant sortant et un courant entrant respectivement. Le champ magnétique diminue lorsqu'on s'éloigne du fil (comme c'est le cas pour le champ électrique d'un fil chargé), ce qui implique que les lignes de champ sont plus éloignées à mesure qu'on s'éloigne du fil. Nous allons voir dans les prochaines sections la façon de calculer le module et l'orientation du champ magnétique produit par un fil et par d'autres configurations de courant.

REMARQUE La règle de la main droite ... FIGURE 8.8 Les lignes de champ magnétique autour d'un courant perpendiculaire à la page. Le champ magnétique produit par un courant est perpendiculaire à la page, ... Le champ magnétique produit est représenté (a) pour un courant qui sort de la page ; (b) pour un courant qui entre dans la page. FIGURE 8.9 (b) Les lignes de champ magnétique peuvent aussi représenter des plus d'aimants permanents, et se rapprochent de la figure 3.6 de la page 85. En effet, les lignes de champ électrique vont jusqu'à l'infini. (a) (b) FIGURE 8.7 Les symboles pour les vecteurs et les courants perpendiculaires à la page p 259 260 CHAPITRE 08 — Le champ magnétique TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 8.1 Dans la figure suivante, quelle est l'orientation du champ magnétique produit par le courant au point P ? 8.2 FIGURE 8.9 Un élément infinitésimal un champ au point P. produit La loi de Biot-Savart Après la découverte d'Ørsted, les physiciens français Jean-Baptiste Biot (17741862) et Félix Savart (1791-1841) ont trouvé une formule permettant de calculer le champ magnétique produit par un fil parcouru par un courant (voir la figure 8.9) montre une partie d'un fil parcouru par un courant. La loi de Biot-Savart permet de calculer le champ magnétique produit par un élément infinitésimal de longueur , orienté selon le sens du courant i et situé à une distance d du point P. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, nous ajoutons le vecteur unitaire entre l'élément de longueur et le point P : (8.1) Selon la loi de Biot-Savart, l'élément de longueur produit un champ magnétique infinitésimal au point P, donné par l'équation : (8.2) Pour obtenir le champ produit par le fil entier, on doit faire la somme (c'est-à-dire calculer l'intégrale) sur tous les éléments de longueur du fil : Loi de Biot-Savart (8.3) Dans le Système international, le champ magnétique se mesure en teslas (T), en l'honneur de l'ingénieur américain d'origine croate Nikola Tesla (1856-1943), qui a entre autres développé les générateurs à courant alternatif. Nous verrons au chapitre 9 la définition exacte du tesla en fonction des autres unités du SI. Un champ magnétique d'un tesla est un très grand champ magnétique. Par exemple, le champ magnétique terrestre varie d'environ 0,2 G à 0,6 G selon la position sur la Terre. Le tableau 8.1 donne quelques exemples de valeurs typiques approximatives du module du champ magnétique. 8.2 — La loi de Biot-Savart 261 TABLEAU 8.1 Quelques valeurs du module du champ magnétique Source B (T) Cerveau humain 10−13 Petit aimant de réfrigérateur 10−6 0,4 × 10−4 Terre (moyen) Soleil (à la surface) 10−2 Barreau aimanté 10−2 Soleil (dans les taches) 0,1 Aimant pour imagerie à résonance magnétique Aimant à supraconducteur 2 10-30 108 Étoile à neutrons La constante μ0 est appelée la constante magnétique (anciennement appelée la perméabilité du vide). Sa valeur dans le SI est (8.4) La loi de Biot-Savart est un équivalent de la loi de Coulomb pour l'électrostatique. On peut en principe calculer le champ magnétique de n'importe quelle configuration de courant à partir de cette loi, mais l'intégrale n'est pas toujours facile à évaluer. Nous verrons au chapitre 10 une équation plus générale, valide pour les courants variables. REMARQUE La constante magnétique μ0 n'a pas d'incertitude. Nous verrons au chapitre 9 que la valeur est choisie pour définir l'ampère, l'unité de courant. Dans le tome 3, nous verrons aussi qu'il existe une relation entre ε0, μ0 et la vitesse de la lumière dans le vide (ce qui explique pourquoi on peut définir le mètre. Lorsqu'il y a plusieurs éléments produisant un champ magnétique, on applique le principe de superposition : (8.5) Principe de superposition Le produit vectoriel La loi de Biot-Savart exprime en fonction d'un produit vectoriel entre l'élément de longueur et le vecteur unitaire . Le produit vectoriel a été expliqué dans le chapitre 2 du tome 1.

Comme nous aurons besoin de ce produit dans les prochaines sections, nous présentons un rappel de ses propriétés. Prenons deux vecteurs quelconques vectoriel de ces deux vecteurs est et , illustrés à la figure 8.10. Le produit FIGURE 8.10 × Le vecteur cultive à et à × , est perpendi- 262 CHAPITRE 08 — Le champ magnétique Le vecteur C possède les propriétés suivantes : • Son module est A = CD sin f, où f est l'angle entre les vecteurs (qui remplir la condition 0 ≤ f ≤ 180°), et θ l'angle • Sa direction est perpendiculaire au plan formé par les vecteurs et .

On peut ainsi dire que est perpendiculaire à la fois à et à . • Le sens de est obtenu à l'aide de la règle de la main droite : on place les doigts de la main droite selon le premier vecteur du produit ( ) ; on tourne les doigts vers le deuxième vecteur ( ), en balayant le plus petit angle ; le pouce donne le sens de . La figure 8.10 illustre l'opération précédente. L'ordre est très important dans un produit vectoriel. En effet, le produit vectoriel est anticommutatif : si on change l'ordre des deux vecteurs, on obtient un vecteur opposé : × Par contre, le produit vectoriel d'un vecteur avec lui-même donne toujours le vecteur nul : car dans ce cas, f = 0. MISE EN GARDE Il est très important d'utiliser le symbole × pour indiquer un produit vectoriel. Il ne faut pas utiliser un point ou ne mettre aucun symbole, car ce dernier symbole indique plutôt un produit scalaire. Le produit vectoriel de deux vecteurs est comme ses opérations mathématiques différentes. La plupart du temps, nous avons besoin de calculer le produit vectoriel de vecteurs exprimés sous forme cartésiennes des vecteurs. Pour faire cela, nous devons calculer le produit vectoriel entre les vecteurs unitaires cartésiens, illustrés à la figure 8.11. D'abord, le produit vectoriel d'un vecteur unitaire avec lui-même donne zéro : × × (8.6) × × (8.6) × × Les autres produits sont obtenus à l'aide de la règle de la main droite : FIGURE 8.11 Les vecteurs unitaires cartésiens × × × (8.7) × × × (8.7) Prenons les vecteurs vectoriel × est alors donné par : Le produit (8.9) × On peut aussi exprimer le produit vectoriel comme un déterminant : × = (8.10) 8.2 — La loi de Biot-Savart 263 Le champ magnétique d'un fil Pour illustrer l'utilisation de la loi de Biot-Savart, calculons le champ magnétique produit par un fil rectiligne, de longueur 2L, parcouru par un courant constant i, comme le montre la figure 8.12. Le fil fait partie d'un circuit qui n'est pas illustré ici. On choisit un système de coordonnées cartésiennes pour que le fil soit sur l'axe des z, entre z = −L et z = L. Le courant circule dans le sens de l'axe des z. On calcule le champ vis-à-vis du centre du fil, pour un point P situé à la coordonnée y. On doit d'abord diviser le fil en éléments de longueur . Un élément, situé à la coordonnée z, est illustré à la figure 8.12. Selon la figure, le courant a le même sens que l'axe des z. L'élément de longueur est fil faut aussi calculer le vecteur unitaire et la distance r entre l'élément de longueur et le point P. Ce dernier point est situé à la coordonnée y sur l'axe des y. Le vecteur allant de l'élément de longueur au point P est × × × À l'aide des équations 8.6 et 8.7 : × × (8.11) En effet, . Celle-ci est une droite dans le sens de × en utilisant l'équation 8.11, on obtient : × En utilisant les équations du produit vectoriel de longueur produit un champ magnétique infinitésimal au point P donné par l'équation 8.2 : Le champ magnétique infinitésimal est calculé à l'aide de la table d'intégrales de l'annexe E, avec x = z et a = y. Ainsi, FIGURE 8.12 Un fil de longueur 2L, en fonction de y et de z. Le champ magnétique est donné par : Le module du champ, situé à la coordonnée y est constante, car on intègre selon la coordonnée z. On vient calculer le champ magnétique au point P. 264 CHAPITRE 08 — Le champ magnétique (8.12) Le champ magnétique est parallèle à l'axe des x, donc il est parallèle au plan de la page. La figure 8.13 montre l'orientation du champ. Pour un point à droite du fil, y > 0, et le champ est opposé à , donc il entre dans la page. Pour un point à gauche du fil, y < 0, et le champ est dans le sens de , donc sortant de la page. Regardons le module du champ dans le cas d'un fil infini. Dans ce cas, le point est très éloigné de l'extrémité du fil, L ≫ y. Dans l'équation 8.12, on peut négliger L 2 dans la racine carrée du dénominateur : FIGURE 8.13 Le champ magnétique de chaque côté d'un fil (Le) Dans un fil infini, le champ magnétique est inversement proportionnel à la distance au fil, et il est orienté selon l'équation un fil infini (8.13) Le point P est situé à une distance y = R du fil ; il ne diminue pas aussi rapidement que celui d'une charge ponctuelle, qui est en 1/r2 pour des points très éloignés de la source du champ, c'est-à-dire pour les points tels que r ≫ 10 cm et dont l'angle au sommet est θ = 160°. Un courant de 15 A circule dans le fil, comme le montre la figure ci-contre. Calculez le champ magnétique créé par l'arc de cercle au point P. (Le fil fait partie d'un circuit, qui n'est pas illustré ici.) SOLUTION Illustrer la situation La figure 8.14 montre l'élément de longueur et le vecteur unitaire . En prenant le produit vectoriel de ces deux vecteurs, nous obtenons le champ magnétique infinitésimal , qui est entrant dans la page, donc orienté selon Décortiquer le problème Ce qui n'est pas connu est la clé de la clé est le module du champ sur l'axe des fil à une distance constante R = P du point P. De plus, les vecteurs et sont perpendiculaires. Le produit vectoriel se calcule alors facilement à partir de la loi de Biot-Savart : FIGURE 8.14 Le schéma de la situation pour l'exemple 8.1 (i) Dans le présent cas, tous les éléments de longueur sont situés à la même distance R du point P. De plus, les vecteurs et sont perpendiculaires. Le produit vectoriel se calcule donc facilement. Le module du produit vectoriel est : (ii) Si on remplace les valeurs de l'équation (ii) de la situation : Identifier les clés Le champ magnétique d'un arc de cercle est l'arc de cercle. Nous insérons l'équation (ii) dans l'équation (i) et nous intégrons sur toute la longueur du fil : (réponse) (iii) L'intégrale de l'élément de longueur donne simplement la longueur du fil. Pour un arc de cercle, la longueur est L = Rf, où R est le rayon de l'arc de cercle et f, l'angle au centre (en radians). Nous obtenons alors 8.3 Valider la réponse Le champ est dans le même sens que celui donné par la règle de la main droite. Le champ magnétique d'un arc de cercle est proportionnel à la longueur de l'arc (proportionnel à l'angle f). TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 8.2 Les fils sont infinis et parcourus par un courant constant i. Les points P sont tous situés à une distance R d'un fil. Ordonnez par ordre croissant les trois points selon le module du champ magnétique 8.2 Les fils sont infinis. Selon l'équation 8.13, le module du champ magnétique est, pour y = R, (8.13) Le module du champ magnétique diminue en 1/r. Ce résultat est semblable à celui que nous avons obtenu pour le champ électrique au chapitre 3, dans le cas d'un fil chargé infini : FIGURE 8.15 Le champ électrique produit par une tige infinie Regardons maintenant le fil infini dans le plan perpendiculaire au fil. Le module du champ dépend de la distance r, les lignes de champ sont des cercles concentriques. Le champ magnétique est toujours tangent aux cercles. C'est le résultat illustré à la figure 8.15. C'est le résultat illustré à la figure 8.15. L'orientation du champ magnétique est obtenue à l'aide de la règle de la main droite donnée à la page 258. Il est aussi possible d'écrire le champ magnétique à l'aide des vecteurs unitaires (voir la figure 8.16).

Selon la loi de Biot-Savart, l'orientation du champ magnétique produit par un long fil est × .

On obtient donc le champ magnétique pour le produit vectoriel à une distance r d'un fil parcouru par un courant i : × (8.14) FIGURE 8.16 Les vecteurs unitaires pour le champ magnétique d'un fil infini Champ magnétique d'un fil infini 266 CHAPITRE 08 — Le champ magnétique TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 8.2 La figure suivante montre deux longs fils parcourus par des courants perpendiculaires à la page. Le champ magnétique résultant est nul au point P. Quel est le sens du courant i2 ? b. Quel est le plus intense ? EXEMPLE 8.2 Le champ magnétique produit par des fils Deux longs fils sont parcourus par des courants de même module (i1 = 5,00 A et i2 = 8,00 A) dans le sens de l'axe des z, comme le montre la figure ci-contre. Calculez le champ magnétique au point P, situé à la coordonnée (x = 0, y = 4 cm et z = 2,50 cm. SOLUTION Illustrer la situation La figure 8.17, nous illustrons les vecteurs associés à chaque fil : avec le champ magnétique produit par ce courant est perpendiculaire au fil. Nous traçons les lignes perpendiculaires à la direction radiale et avec les sens obtenu à l'aide de la règle de la main droite. × × × Identifier les clés La première clé est que chaque fil produit un champ magnétique obtenu à l'aide de l'équation 8.14 : × (i) La deuxième clé est que le champ magnétique résultant est obtenu en appliquant le principe de superposition, c'est-à-dire l'équation 8.5 : (ii) Résoudre le problème FIGURE 8.17 Les vecteurs unitaires pour l'exemple 8.2 Nous calculons le champ magnétique produit par chaque fil : Décortiquer le problème × Selon le champ résultant, nous avons × × × 8.4 — Les boucles de courant et les dipôles magnétiques Le champ résultant est 267 Valider la réponse Les champs magnétiques calculés ont la même orientation que celle indiquée dans la figure 8.17. La solution peut être vérifiée sans conducteur. 8.4 Les boucles de courant et les dipôles magnétiques Le champ magnétique d'une boucle de courant La loi de Biot-Savart permet de calculer le champ magnétique produit par une boucle conductrice, parcourue par un courant continu i. Pour ce faire, la figure 8.18a montre une boucle de rayon R, dans le plan xy et centrée à l'origine. On veut calculer le champ magnétique au point P, situé à la coordonnée z sur l'axe de la boucle. La figure 8.18b montre une projection dans le plan yz.

(a) (b) FIGURE 8.18 (a) Une boucle de rayon R est parcourue par un courant i. (b) Une projection de la boucle avec les vecteurs pour le calcul du champ magnétique.

Soit un élément illustré, qui est situé sur l'axe des y. Selon la loi de BiotSavart, un élément produit un champ magnétique : × A cet endroit, le courant entre dans la page de telle sorte que On a aussi Le produit vectoriel entre et 268 CHAPITRE 08 — Le champ magnétique × Le champ a la même orientation que ce produit vectoriel. Ce champ magnétique infinitésimal est dans le plan yz et forme un angle θ avec l'axe des z. Il s'oppose à cet élément ; l'élément de longueur est dans le plan xy qui se trouve dans le plan yz. Le produit vectoriel illustré à la figure 8.18b. Pour cet élément, le champ magnétique infinitésimal est donné par équivalent : × On remarque que l'élément symétrique produit un champ magnétique qui a la même composante z, mais une composante y opposée au champ infinitésimal , car la distance et est la même. Lorsqu'on va calculer l'intégrale, la composante y et chaque champ infinitésimal sera annulée. Pour les autres éléments de la boucle, le champ aura une composante z et une composante horizontale. La composante horizontale sera annulée par l'élément de longueur opposé, ce qui laissera uniquement la composante z. Le champ magnétique résultant est dans le sens de l'axe des z. Nous obtenons en intégrant uniquement la composante z des champs infinitésimaux : où on a sorti les constantes de l'intégrale (la coordonnée z est une constante, car le point P est fixe). Il ne reste qu'à intégrer sur l'élément , ce qui donne simplement la longueur de la boucle, c'est-à-dire 2πR. Le champ magnétique sur l'axe d'une boucle est : (8.15) Le champ magnétique au centre de la boucle (z = 0) est donné par : 8.4 — Les boucles de courant et les dipôles magnétiques Le champ magnétique dépend du sens du courant dans la boucle.

On trouve une nouvelle règle de la main droite pour donner l'orientation de selon l'orientation du courant dans la boucle. On enroule les doigts de la main droite selon le sens du courant. Le sens du champ magnétique au centre et sur l'axe de la boucle est donné par le pouce. Règle de la main droite pour le champ sur l'axe de la boucle FIGURE 8.19 (ii) Le champ magnétique sur l'axe de la boucle. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 8.3 La figure suivante montre des configurations de boucles de courant. Chaque boucle est parcourue par le même courant i. Classez les configurations par ordre décroissant du module du champ magnétique au point P, situé au centre de la boucle. FIGURE 8.19 (i) (ii) (iii) Le champ magnétique sur l'axe des boucles dipôles magnétiques On vient maintenant obtenir le champ magnétique d'une boucle de courant pour des points éloignés de la boucle. Pour des points sur l'axe de la boucle pour |z| ≫ R : où A = πR 2 est l'aire de la boucle. Il ne reste que le module du champ pour des points éloignés, la forme de la boucle n'a pas d'importance, seulement son aire.

L'équation 8.15 permet de calculer le champ magnétique d'une boucle de rayon R (8.16) L'équation 8.16 montre que l'aire est importante.

C'est la raison pour laquelle on écrit le champ en fonction de l'aire de la boucle. Au chapitre 3, nous avons considéré le vecteur comme un vecteur qui est perpendiculaire à une surface et dont le module donne l'aire de la surface. Ce vecteur est aussi utile ici, car le champ magnétique est perpendiculaire au plan de la boucle. Il y a par contre une ambiguïté dans le sens du vecteur , car il y a deux sens possibles pour un vecteur perpendiculaire à la boucle. On lève cette ambiguïté en ajoutant une convention pour le vecteur , qu'on appelle la convention de la main droite (voir la figure 8.20). On oriente les doigts de la main droite selon le courant dans la boucle. Le sens du pouce donne l'orientation du vecteur qui représente l'aire de la boucle. Le champ magnétique au centre et sur l'axe de la boucle a la même orientation que le vecteur . Le champ magnétique sur l'axe de la boucle pour des points éloignés est (sur l'axe, pour $|z| \gg R$) . (8.16) FIGURE 8.20 La convention de la main droite pour le vecteur Convention de la main droite 269 270 CHAPITRE 08 — Le champ magnétique Ce champ magnétique a la même forme que le champ électrique sur l'axe d'un dipôle électrique. Nous avons vu au chapitre 2 qu'un dipôle électrique est constitué d'une charge +q et d'une charge −q. Selon l'équation 2.7 de la page 43, le champ électrique à une distance z sur l'axe d'un dipôle électrique est où est le moment dipolaire électrique, qui caractérise le dipôle électrique.

En comparant cette équation avec l'équation 8.16, on remarque que la constante électrique est remplacée par la constante magnétique (au numérateur à la place du dénominateur). Le même facteur $1/(2\pi |z|^3)$ apparaît. Le moment dipolaire électrique est remplacé par le facteur i . On définit donc le moment dipolaire magnétique (ou simplement le moment magnétique) de la boucle ainsi : (8.17) μ FIGURE 8.21 L'orientation du moment magnétique μ Dans le SI, le moment magnétique se mesure en $A \cdot m^2$. Le moment magnétique d'une boucle est un vecteur qui a la même orientation que le vecteur : son orientation est obtenue à l'aide de la convention de la main droite (voir la figure 8.21). Avec cette définition, le champ magnétique sur l'axe d'une boucle est μ (sur l'axe avec $|z| \gg R$) . (8.18) Pour des points éloignés, une boucle de courant produit un champ magnétique équivalant au champ produit par un barreau aimanté, avec un pôle nord et un pôle sud séparés par une certaine distance.

Le vecteur μ est orienté comme s'il reliait le pôle sud au pôle nord (voir la figure 8.22a), de la même façon que le vecteur est orienté de la charge électrique négative vers la charge électrique positive. On peut donc caractériser un barreau aimanté par un vecteur moment magnétique μ, de telle façon que l'équation 8.18 donne le champ magnétique de l'aimant. La figure 8.22b montre les lignes de champ pour une boucle de courant et pour un barreau aimanté. (a) (b) FIGURE 8.22 (a) Une boucle parcourue par un courant est équivalente à un barreau aimanté pour des points éloignés. Les deux configurations sont des dipôles magnétiques. (b) Les lignes de champ magnétique pour les deux configurations.

On a considéré une boucle simple.

On peut aussi fabriquer un solénoïde (aussi appelé bobine hélicoïdale) constitué de N spires, en enroulant un fil conducteur sur un cylindre. Chaque spire est équivalente à une boucle de courant.

Pour des points éloignés, le champ magnétique résultant est simplement le champ d'une 8.5 — Le théorème d'Ampère 271 boucle multiplié par le nombre de spires. On tient compte du nombre de spires dans la définition du moment magnétique : (8.19) μ Moment magnétique Avec cette définition, le champ pour des points éloignés du solénoïde est donné par l'équation 8.18. MISE EN GARDE Veillez à ne pas confondre le vecteur moment magnétique μ et la constante magnétique μ_0. EXEMPLE 8.3 Le champ d'un dipôle magnétique Une bobine plate est formée en enroulant un long fil sur un cylindre de carton de 1,00 cm de rayon. La bobine a 500 spires.

À une distance de 15 cm au-dessus de la bobine et sur son axe, le module du champ magnétique est de $4{,}5 \times 10^{-5}$ T. a. Quel est le module du moment magnétique de la bobine ? b. Quel est le courant qui circule dans la bobine ? SOLUTION Décortiquer le problème SOLUTION b. Identifier la clé La clé est la définition du moment magnétique pour une bobine (voir l'équation 8.19) : (ii) SOLUTION a. Identifier la clé Nous supposons que $|z| \gg R$ pour pouvoir utiliser l'équation 8.18 comme une bonne approximation du champ magnétique. Cette équation permet de calculer le module du moment magnétique de la bobine : (i) Résoudre le problème Nous obtenons donc (réponse) Valider la réponse Nous répondons bien aux questions. Remarquez qu'il faut un courant assez important et une bobine avec un grand nombre de spires pour produire un petit champ magnétique. Résoudre le problème Nous remplaçons les valeurs : (réponse) 8.5 Le théorème d'Ampère Le physicien français André-Marie Ampère (1775–1836) (voir la figure 8.23 à la page suivante), peu de temps après la découverte d'Ørsted, a découvert une méthode pour obtenir l'orientation du champ magnétique autour d'un long fil. Selon Ampère, le champ magnétique produit par un long fil parcouru par un courant continu est tangent à un cercle qui entoure le fil, et son module est uniforme le long du cercle. Ce résultat est un cas particulier du théorème qui porte son nom. 272 CHAPITRE 08 — Le champ magnétique Nous avons vu deux méthodes pour calculer le champ électrique engendré par une distribution continue de charge. Au chapitre 2, le champ électrique a été calculé à l'aide d'une intégrale basée sur la loi de Coulomb. Au chapitre 3, le champ électrique a été calculé pour des configurations ayant certaines symétries, à l'aide du théorème de Gauss. Cette dernière méthode ne peut pas être utilisée pour des configurations quelconques.

Cependant, lorsqu'on peut l'utiliser, elle permet de calculer facilement le champ électrique. La loi de Biot-Savart est l'équivalent de la loi de Coulomb. Elle permet de calculer de façon générale le champ magnétique pour n'importe quelle configuration de courant continu. Au besoin, un ordinateur peut être utilisé pour calculer l'intégrale.

Il existe aussi une méthode, basée sur la symétrie d'une configuration, qui est la méthode du théorème d'Ampère.

FIGURE 8.23 André-Marie Ampère (1775-1836), physicien français Pour comprendre d'où vient ce théorème, on commence par comparer les lignes de champ électrique et les lignes de champ magnétique dans le cas de deux configurations simples. La figure 8.24a illustre les lignes de champ électrique produit par une charge ponctuelle positive +q. Les lignes de champ vont de la charge positive jusqu'à l'infini de façon radiale. À la figure 8.24b, les lignes de champ magnétique produit par un fil infini sont illustrées. Cette fois-ci, les lignes de champ forment des cercles fermés.

La figure 8.24 présente des exemples simples qui illustrent les caractéristiques des lignes de champ électrique et des lignes de champ magnétique. Les lignes de champ électrique divergent vers l'infini, alors que les lignes de champ magnétique tournent autour d'un courant. (a) (b) FIGURE 8.24 (a) Les lignes du champ électrique produit par une charge ponctuelle. (b) Les lignes du champ magnétique produit par un fil infini dans lequel circule un courant. Le flux La divergence des lignes de champ électrique est mise en évidence lorsqu'on calcule le flux à travers une surface fermée. Selon la section 3.2, le flux est proportionnel au nombre de lignes de champ qui traversent une surface. À la figure 8.25a, on a tracé une surface de Gauss quelconque autour de la charge électrique. Les lignes de champ sortent de la surface de Gauss, ce qui correspond à un flux électrique non nul. Selon le théorème de Gauss (voir l'équation 3.10), À la figure 8.25b, on a aussi tracé une surface de Gauss autour du fil pour calculer le flux magnétique à travers la surface.

Étant donné que les lignes de champ magnétique forment des courbes fermées, les lignes qui entrent dans la surface à un endroit ressortent de la surface à un autre endroit. Il y a autant de lignes 8.5 — Le théorème d'Ampère 273 entrant dans la surface que de lignes sortant de la surface. Le flux magnétique est donc nul : (8.20) Théorème de Gauss pour le magnétisme C'est le théorème de Gauss pour le magnétisme. Cette équation est générale, car les lignes de champ magnétique forment toujours des courbes fermées, puisque les monopôles magnétiques n'existent pas. Le flux magnétique à travers une surface fermée est toujours nul. Le théorème de Gauss n'est donc pas utile pour calculer le champ magnétique d'une configuration, puisque le flux magnétique est nul pour toutes les configurations. (a) (b) FIGURE 8.25 (a) Le flux électrique est positif, car les lignes de champ sortent de la surface. (b) Le flux magnétique est nul, car il y a autant de lignes de champ entrantes que de lignes de champ sortantes.

La circulation La rotation des lignes de champ est mise en évidence mathématiquement en introduisant le concept de circulation du champ. La circulation d'un champ est définie par une intégrale curviligne du champ le long d'un parcours fermé. Pour calculer cette intégrale, on doit diviser le parcours en éléments , tangents au parcours. Prenons par exemple le champ électrique d'une charge ponctuelle +q, illustré à la figure 8.26, avec le parcours fermé qui est tracé en pointillé. La circulation est définie par l'équation : (8.21) La notation indique qu'il s'agit d'un parcours fermé. Pour le champ électrique, la circulation correspond à la différence de potentiel, car l'équation 8.21 est équivalente à l'équation 4.10 de la page 126. Comme le parcours est fermé, on obtient la différence de potentiel $\Delta V = V_a - V_a = 0$. La circulation du champ électrique est nulle lorsque le champ est produit par des charges électriques* : (8.22) Ceci est la conséquence du fait que la force électrique est conservative. La loi des mailles, utilisée au chapitre 7, en est une conséquence. La circulation nulle du * Au chapitre 10, nous étudierons un champ électrique qui n'est pas produit par des charges, et dont la circulation n'est pas nulle.

FIGURE 8.26 On calcule la circulation d'un champ électrique pour un parcours fermé. 274 CHAPITRE 08 — Le champ magnétique champ électrique montre que les lignes de champ électrique issues d'une charge ponctuelle ne tournent pas. Contrairement au champ électrique, le champ magnétique peut avoir une circulation non nulle.

Prenons par exemple le champ magnétique produit par un fil infini et calculons la circulation sur un parcours circulaire de rayon r, centré sur le fil (voir la figure 8.27). Un courant continu i circule dans le fil. Selon l'équation 8.14, le champ magnétique est tangent au cercle, et son module est uniforme le long du cercle : FIGURE 8.27 Le calcul de la circulation du champ magnétique produit par un fil infini, sur un cercle de rayon r La circulation du champ est donc L'intégrale donne simplement la longueur du parcours, c'est-à-dire 2π r. On obtient donc On voit que la circulation du champ magnétique ne dépend pas du rayon du cercle choisi, mais seulement du courant qui traverse le cercle. On remarque donc que le flux électrique dépend de la charge électrique et que la circulation du champ électrique est nulle.

À l'opposé, le flux magnétique est toujours nul, alors que la circulation du champ magnétique dépend du courant. Le théorème d'Ampère Le dernier calcul est un exemple du théorème d'Ampère. Soit une boucle fermée quelconque, qu'on appelle une boucle d'Ampère, qui entoure des fils parcourus par des courants. Selon le théorème d'Ampère, la circulation du champ magnétique dépend uniquement du courant qui traverse la boucle d'Ampère et non de la longueur du parcours : Théorème d'Ampère (8.23) Ici, iinc est le courant inclus dans la boucle, c'est-à-dire le courant qui passe à travers la surface délimitée par la boucle. Si le courant ne passe pas à travers la boucle d'Ampère, il ne contribue pas à la circulation du champ magnétique, même s'il produit un champ magnétique. La forme exacte et la position précise des courants à l'intérieur de la boucle n'ont pas d'effet sur le résultat de l'intégrale. La description précédente est semblable au théorème de Gauss en électricité, où le flux électrique à travers une surface fermée dépend uniquement de la charge électrique à l'intérieur de la surface et non de la position exacte des charges à l'intérieur ou de la forme de la surface de Gauss. 8.5 — Le théorème d'Ampère 275 Dans le théorème de Gauss, les charges positives et les charges négatives produisent un flux opposé, qui est nul lorsque la charge nette à l'intérieur de la surface est nulle. Dans le cas du théorème d'Ampère, le sens du courant qui traverse la boucle est aussi important. Dans l'équation 8.23, on doit ajouter un signe pour le courant, selon son sens, en fonction de la règle de la main droite. D'abord, il faut choisir un sens arbitraire pour le parcours d'intégration. Le signe du courant dépend de ce sens : On enroule les doigts de la main droite selon le sens du parcours d'intégration. Le pouce indique le sens positif pour le courant dans le calcul de la circulation du champ magnétique. Si le courant est dans le sens du pouce, alors il est positif. Au contraire, si le courant est opposé au pouce, il est négatif. La figure 8.28 montre une boucle d'Ampère qui entoure deux fils, avec un parcours en sens antihoraire. Selon la règle de la main droite, le sens positif du courant est le sens sortant de la page. La circulation du courant, pour cet exemple, est Le courant i3 ne contribue pas à l'intégrale parce qu'il ne traverse pas la boucle d'Ampère. Tout comme le théorème de Gauss, le théorème d'Ampère est utile pour calculer le champ magnétique seulement dans certains cas, lorsque la symétrie de la configuration de courant permet de connaître l'orientation du champ magnétique. De cette façon, on peut choisir une boucle d'Ampère de telle sorte que l'intégrale de la circulation soit très simple à calculer. La symétrie cylindrique du fil infini est un de ces cas. Nous verrons d'autres configurations dans les prochains exemples et la prochaine section. REMARQUE Une boucle d'Ampère est une courbe mathématique. Elle ne correspond pas nécessairement à une courbe réelle. On la choisit pour pouvoir appliquer le théorème d'Ampère. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 8.4 La figure suivante montre trois boucles d'Ampère et trois fils parcourus par un même courant i. Classez les boucles par ordre croissant (de la plus négative à la plus positive) selon la valeur de la circulation du champ magnétique ( ) pour des parcours d'intégration en sens horaire. FIGURE 8.28 La règle de la main droite est utilisée pour obtenir le signe du courant dans le théorème d'Ampère. 276 CHAPITRE 08 — Le champ magnétique EXEMPLE 8.4 Le champ produit par un fil Un long fil, de rayon R, est parcouru par un courant i uniformément distribué sur sa section transversale. a. Calculez le module du champ magnétique à l'intérieur du fil, à une distance r < R du centre du fil. b. Calculez le module du champ magnétique à l'extérieur du fil, à une distance r > R du centre du fil. SOLUTION a. Illustrer la situation La figure 8.29a montre le fil parcouru par le courant i et la figure 8.29b, une coupe transversale agrandie du fil, avec le courant sortant de la page. La boucle d'Ampère choisie est circulaire, de rayon r, qui correspond à l'endroit où nous voulons calculer le champ magnétique. la configuration. Nous trouvons le sens du champ à l'aide de la règle de la main droite : nous plaçons le pouce selon le sens du courant (qui sort de la page), et le champ tourne selon le sens des doigts (en sens antihoraire). Nous choisissons donc le sens du parcours d'intégration pour qu'il soit antihoraire. Identifier la clé La clé est le théorème d'Ampère : (i) Résoudre le problème (a) (b) FIGURE 8.29 (a) Le fil parcouru par un courant i. (b) Une coupe transversale agrandie avec la boucle d'Ampère et le champ magnétique. Décortiquer le problème La configuration a une symétrie cylindrique. Le champ magnétique doit être tangent au cercle choisi comme boucle d'Ampère, car si nous faisons une réflexion par rapport à un diamètre du cylindre, la configuration ne change pas.

De plus, le module du champ doit être uniforme, car si nous tournons le cylindre de n'importe quel angle, cela ne change pas Comme le montre la figure 8.29b, le champ magnétique est parallèle à l'élément d (donné par la flèche orange), car les deux vecteurs sont tangents au cercle. De plus, le module du champ doit être uniforme le long du cercle. Alors, (ii) Ici, le rayon r correspond au rayon de la boucle d'Ampère, car c'est sur cette boucle que se calcule l'intégrale curviligne. Il faut faire attention, dans le calcul de iinc, car ce n'est pas tout le courant i qui passe à travers la boucle d'Ampère. Comme le courant est uniformément distribué, cela implique que le module de la densité de courant $J = i/(\pi R^2)$ est uniforme. Alors, (iii) En insérant les équations (ii) et (iii) dans l'équation (i), nous obtenons (réponse) 8.5 — Le théorème d'Ampère SOLUTION b. Illustrer la situation 277 Résoudre le problème Pour trouver le champ à l'extérieur du fil, nous avons besoin d'une boucle d'Ampère de rayon r > R, comme le montre la figure 8.30. L'intégrale curviligne se calcule de la même façon que dans la partie a. : (v) où r est le rayon de la boucle d'Ampère. Comme le montre la figure 8.30, c'est tout le courant i qui passe à travers la boucle d'Ampère, cette fois-ci. Alors, iinc = i. Nous insérons ces résultats dans l'équation (v) : (réponse) FIGURE 8.30 Une section transversale du fil avec la boucle d'Ampère et le champ magnétique Valider la réponse Nous remarquons que le champ magnétique est nul au centre du fil et qu'il augmente jusqu'à la surface.

À l'extérieur du fil, le champ magnétique diminue en 1/r, comme nous l'avons vu à l'équation 8.16. La figure 8.31 montre la relation entre le module du champ et la distance r. Décortiquer le problème Le champ magnétique doit de nouveau être tangent, car la configuration a la même symétrie cylindrique. Il doit tourner de façon antihoraire, selon la règle de la main droite. Le parcours d'intégration est choisi en sens antihoraire. Identifier la clé La clé est de nouveau le théorème d'Ampère : FIGURE 8.31 (iv) EXEMPLE 8.5 Le graphique du module du champ magnétique en fonction de la distance du centre du fil Le champ d'une bobine toroïdale Une bobine toroïdale est un enroulement de fil autour d'un tore (communément appelé un beigne), comme le montre la figure suivante. Le rayon intérieur de la bobine est a = 2,00 cm, et son rayon extérieur est b = 10,0 cm. La bobine possède 600 spires jointives (très rapprochées), et le courant dans le fil est de 3,50 A. Calculez le module du champ magnétique à une distance de 5,00 cm du centre. 278 CHAPITRE 08 — Le champ magnétique SOLUTION Illustrer la situation Identifier la clé La clé est le théorème d'Ampère : Nous présentons, à la figure 8.32, le parcours d'intégration. Chaque spire peut être considérée comme une boucle de courant circulaire. Selon la règle de la main droite pour les boucles de courant, le champ magnétique doit être orienté vers la droite pour la spire du haut, et son orientation doit tourner en sens horaire par rapport au centre du tore. (i) Résoudre le problème Le champ magnétique est uniforme et dans le même sens que l'élément d sur tout le parcours d'intégration. L'intégrale curviligne est alors (ii) Pour chaque spire, le courant traverse la boucle d'Ampère dans le sens positif. Avec N spires, le courant qui passe à travers la boucle d'Ampère est (iii) FIGURE 8.32 Nous insérons les équations (ii) et (iii) dans l'équation (i) : Le parcours d'intégration et le champ magnétique pour une spire (iv) Décortiquer le problème Il ne reste qu'à remplacer les valeurs dans l'équation (iv) : Pour des spires jointives, la configuration est symétrique sous une rotation autour du centre du tore. En effet, le tore peut être tourné d'un angle quelconque, et la situation ne change pas. De plus, on peut faire une réflexion par rapport à n'importe quel plan qui passe par le centre du tore.

Ceci implique que le champ magnétique doit être tangent à un cercle centré sur le tore et que son module doit être uniforme le long de ce cercle. Nous choisissons alors un parcours d'intégration circulaire horaire, de rayon r = 5,00 cm. 8.6 (réponse) Valider la réponse Nous répondons bien à la question. Remarquez que le champ magnétique est nul dans le trou et à l'extérieur du tore. Dans ces cas, on choisit une boucle d'Ampère circulaire avec r < a ou r > b respectivement. Par symétrie, le champ magnétique doit être tangent à un cercle, iinc = 0 et B = 0. La bobine toroïdale est donc une configuration qui produit un champ magnétique dans une région limitée.

Le champ magnétique produit par les solénoïdes Lors de l'étude de l'électrostatique, nous avons exploré l'effet d'un champ électrique uniforme. Ce champ est produit en utilisant deux grandes plaques parallèles qui ont des charges opposées uniformément distribuées. Dans l'étude 8.6 — Le champ magnétique produit par les solénoïdes 279 du magnétisme, toutes les configurations vues jusqu'à présent produisent un champ magnétique qui varie en module et en orientation d'un point à l'autre. Nous étudions maintenant une configuration qui produit un champ uniforme : l'intérieur d'un long solénoïde, aussi appelé une bobine hélicoïdale. Au prochain chapitre, nous allons utiliser des champs magnétiques uniformes pour examiner la force magnétique sur les particules chargées.

On construit un solénoïde en enroulant un fil sur un cylindre (voir la figure 8.33). Un solénoïde peut contenir des centaines de spires, parfois sur plusieurs couches. Si on fait circuler un courant i dans le solénoïde, le même courant i circule dans chaque spire. Chaque spire est équivalente à une boucle circulaire. Le champ magnétique résultant est la superposition des champs magnétiques produits par chaque spire. Le champ sur l'axe d'une boucle de courant a été calculé à la section 8.4. FIGURE 8.33 Un solénoïde est un enroulement de fil sur un cylindre. FIGURE 8.34 Le champ magnétique près d'une boucle de courant Pour comprendre le champ résultant, nous allons étudier la superposition du champ de trois boucles. La figure 8.34 montre les lignes de champ et le champ magnétique à quelques endroits près d'une boucle. La figure 8.35a illustre les champs magnétiques produits par trois boucles. On trouve que le champ magnétique au centre de la boucle 2 (le point P1) est important, car les trois champs sont dans le même sens. Pour un point P2 à l'extérieur de la boucle 2, le champ est beaucoup plus faible, car le champ de la boucle du centre est presque complètement annulé par les champs produits par les deux autres boucles.

La figure 8.35b montre le champ résultant aux points P1 et P2. (a) (b) FIGURE 8.35 (a) Les champs magnétiques produits par trois boucles de courant.

(b) Le champ magnétique résultant produit par trois boucles de courant. Lorsqu'on ajoute un grand nombre de boucles de courant, on obtient un champ très intense au centre du solénoïde et un champ très faible à l'extérieur. De plus, le champ change très peu d'un point à l'autre. Il est presque uniforme.

La figure 8.36 montre les lignes de champ pour un solénoïde ayant huit spires.

FIGURE 8.36 Les lignes de champ magnétique d'un solénoïde de huit spires selon une vue en coupe 280 CHAPITRE 08 — Le champ magnétique Le solénoïde idéal Un solénoïde idéal est un solénoïde dont la longueur tend vers l'infini et les spires sont jointives. Aucun solénoïde réel n'est infini, mais lorsque la longueur du solénoïde est beaucoup plus grande que son rayon, le centre du solénoïde se comporte comme un solénoïde idéal. Pour un solénoïde infini, le champ magnétique est nul à l'extérieur. De plus, la symétrie cylindrique impose un champ qui soit perpendiculaire aux spires et uniforme. En effet, si on déplace le solénoïde selon son axe ou si on effec tue une rotation autour de son axe, cela ne change pas la configuration. On ne change rien non plus si on fait une réflexion par rapport à un plan qui passe par l'axe du solénoïde. La figure 8.37 montre une coupe transversale d'un très long solénoïde avec le sens du courant dans les spires. Le solénoïde a N spires, une longueur L et un rayon R (avec $L \gg R$). On définit le nombre de spires par unité de longueur n par : (8.24) FIGURE 8.37 Le calcul du champ à l'intérieur d'un solénoïde idéal À l'intérieur du solénoïde, le champ magnétique est uniforme. On trouve son orientation à l'aide de la règle de la main droite pour les boucles de courant : on tourne les doigts de la main droite selon le sens du courant, et le pouce donne le sens de , donc vers la droite. Pour calculer le module du champ, on applique le théorème d'Ampère pour une boucle d'Ampère rectangulaire, illustrée à la figure 8.37. Cette boucle est en partie dans le solénoïde et en partie à l'extérieur de celui-ci. Elle a une longueur et une largeur h. Le champ est alors soit parallèle, soit perpendiculaire à chacun des côtés de la boucle. Selon le théorème d'Ampère, (8.25) On divise l'intégrale curviligne en quatre parties : Pour la première intégrale, le champ est uniforme et il a la même orientation que l'élément : Pour la deuxième intégrale et la quatrième intégrale, le résultat est nul, car sont perpendiculaires : et et 8.6 — Le champ magnétique produit par les solénoïdes 281 La troisième intégrale est aussi nulle, car le champ magnétique est nul à l'extérieur du solénoïde idéal : Le membre droit de l'équation 8.25 dépend du courant qui passe à travers la boucle d'Ampère. Il y a plusieurs spires qui passent à travers la boucle d'Ampère, selon la longueur de la boucle d'Ampère. Comme le nombre de spires par unité de longueur est n, le courant qui passe à travers la boucle d'Ampère est En insérant les dernières équations dans l'équation 8.25, on obtient Le module du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde idéal est donc (8.26) Module du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde idéal où N est le nombre total de spires et L, la longueur du solénoïde. Pour trouver l'orientation du champ magnétique à l'intérieur, on utilise la règle de la main droite pour les boucles de courant : On tourne les doigts de la main droite selon l'orientation du courant dans le solénoïde.

Le pouce donne l'orientation du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde. Orientation du champ à l'intérieur du solénoïde Le champ magnétique à l'intérieur d'un long solénoïde est à peu près uniforme. Ceci est l'équivalent magnétique des grandes plaques en électrostatique. Pour obtenir un champ électrique uniforme, on doit être près du centre entre deux très grandes plaques.

Pour obtenir un champ magnétique uniforme, on doit être près du centre d'un très long solénoïde. EXEMPLE 8.6 Le champ d'un solénoïde On veut produire un champ magnétique de 0,110 T à l'intérieur d'un solénoïde idéal parcouru par un courant de 9,50 A. Le solénoïde a une longueur de 10,0 cm. Combien de spires doit-il posséder ? SOLUTION Décortiquer le problème Résoudre le problème Nous remplaçons les valeurs : (réponse) Valider la réponse Nous répondons bien à la question. Pour obtenir le nombre de spires sur une petite distance, il faudra enrouler le fil sur plusieurs couches. Identifier la clé La clé est l'équation 8.26 : (i) 282 CHAPITRE 08 — Le champ magnétique Le champ sur l'axe d'un solénoïde réel La dernière sous-section a permis d'obtenir le champ à l'intérieur d'un solénoïde, près du centre. Il est aussi intéressant d'étudier le champ magnétique près des extrémités du solénoïde. Le théorème d'Ampère ne peut pas être utilisé, car la configuration n'a pas la symétrie cylindrique pour un point près de l'extrémité. En effet, si on déplace le solénoïde, la configuration change. Il faut donc utiliser la loi de Biot-Savart. On va se limiter aux points sur l'axe du solénoïde, de telle sorte qu'il est possible de calculer l'intégrale algébriquement. FIGURE 8.38 Le calcul du champ magnétique sur l'axe d'un solénoïde La figure 8.38 montre un solénoïde de longueur L et de rayon R parcouru par un courant i. On veut calculer le champ magnétique en un point P, situé à une distance h d'une des extrémités du solénoïde, sur l'axe de ce dernier. Pour simplifier le calcul de l'intégrale, on trace un axe des z orienté vers le haut avec son origine au point P.

On suppose aussi que le solénoïde se comporte comme un ensemble de boucles très rapprochées. Selon l'équation 8.15, chaque boucle produit un champ magnétique : où z est la distance entre la boucle de courant et le point P. À la figure 8.38, on considère un ensemble de boucles ayant une épaisseur dz, situées à une distance z du point P. Dans cette épaisseur, il y a n dz boucles, où n est le nombre de spires par unité de longueur du solénoïde. Le champ magnétique produit par cette épaisseur de boucle est Le champ résultant est obtenu en intégrant sur toute la longueur du solénoïde. Selon la figure 8.38, les bornes d'intégration sont z = −h pour la borne inférieure (z < 0, car on est sous l'origine) et z = L − h pour la borne inférieure. On obtient, après avoir sorti les constantes de l'intégrale, L'intégrale se calcule à l'aide de la table d'intégrales de l'annexe E (avec x → z et a → R). On obtient (8.27) FIGURE 8.39 Le module du champ en fonction de la distance h entre le point P et le bas du solénoïde, pour L = 10R L'équation précédente semble complexe, car on n'a pas fait d'approximation.

La figure 8.39 montre le module du champ en fonction de la position h du point P.

Remarquez que les extrémités du solénoïde correspondent à h = 0 et à h = L. Les points h > 0 correspondent aux points P situés au-dessus de la partie inférieure du solénoïde. 8.6 — Le champ magnétique produit par les solénoïdes On peut regarder deux positions particulières dans l'approximation où $L \gg R$. D'abord, pour un point au centre du solénoïde (h = L/2), on obtient (8.28) C'est le résultat obtenu pour le module du champ à l'intérieur d'un solénoïde infini (voir l'équation 8.26). Ceci montre qu'on peut bel et bien considérer un solénoïde comme étant idéal pour les points près du centre, lorsque la longueur du solénoïde est beaucoup plus grande que son rayon. La deuxième position intéressante est l'extrémité du solénoïde h = 0. Dans ce cas, avec l'approximation $L \gg R$, (8.29) Ceci montre que le module du champ à l'extrémité est égal à la moitié du module du champ au centre du solénoïde. On trouve exactement le même résultat pour l'autre extrémité (avec h = L). L'équation 8.27 est utile pour déterminer le champ magnétique près du solénoïde ou à l'intérieur de celui-ci. Pour les points très éloignés du solénoïde, ce dernier se comporte comme un dipôle magnétique, avec un moment magnétique μ , comme nous l'avons vu à la section 8.4. 283 284 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES RÉSUMÉ RÉSUMÉ Dans ce chapitre, nous avons étudié le champ magnétique produit par des courants électriques. LES LOIS ET LES PRINCIPES • Le champ magnétique est le médiateur de la force magnétique. Il est produit par les aimants et les courants électriques. • La loi de Biot-Savart permet de calculer le champ magnétique produit par un courant continu i : × • Un aimant possède un pôle nord et un pôle sud. • Les lignes de champ magnétique forment des boucles fermées, en sortant du pôle nord et en entrant au pôle sud. • Le théorème d'Ampère permet de calculer le champ magnétique dans certaines situations où la configuration de courant est symétrique : • Les pôles semblables se repoussent, et les pôles opposés s'attirent. • On ne peut pas isoler deux pôles magnétiques et obtenir des monopôles magnétiques.

• Selon le théorème de Gauss en magnétisme, le flux magnétique à travers une surface fermée est toujours nul : où iinc est le courant inclus dans la boucle d'intégration.

• Lorsqu'il y a plusieurs sources de champ magnétique, le champ résultant est obtenu à l'aide du principe de superposition: LES RÉSULTATS • Le fil infini : • Le solénoïde idéal : × • Le dipôle magnétique pour $|z| \gg R$: μ • La règle de la main droite: où μ – Pour un fil rectiligne : le pouce est orienté selon le courant, et les doigts tournent selon le champ magnétique.

– Pour une boucle : les doigts sont orientés selon le courant, et le pouce donne le moment magnétique et le champ magnétique sur l'axe.

QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 285 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Q questions qualitatives • E exercices simples • P problèmes • solution disponible Section 8.2 La loi de Biot-Savart Q1 Un courant i circule dans un fil de longueur L, comme le montre la figure 8.40. On veut calculer le champ magnétique au point P, situé à une distance d au-dessus d'une extrémité du fil (voir la figure 8.40). a. Écrivez une expression pour l'élément de longueur b. Écrivez une expression pour le vecteur unitaire c. Calculez le produit vectoriel × . FIGURE 8.42 • Problème 4 . . d. Écrivez l'intégrale pour calculer le champ magnétique au point P. P5 Le fil de la figure 8.43 est parcouru par un courant i.

À l'aide de la loi de Biot-Savart, montrez que le champ magnétique au centre du demi-arc de cercle est donné par FIGURE 8.40 • Question 1 FIGURE 8.43 • Problème 5 E2 Calculez P6 Un fil est courbé pour former un circuit, comme le × pour les vecteurs suivants : a. b. montre la figure 8.44. Le circuit est constitué de deux demicercles et de deux segments. Un courant i circule en sens horaire. Calculez le champ magnétique au point P. c. d. P3 Un fil rectiligne ayant une longueur L = 4,0 m trans- porte un courant i = 25,0 A (voir la figure 8.41). Quel est le champ magnétique produit à une distance d = 30 cm audessus de l'extrémité du fil ? FIGURE 8.44 • Problème 6 P7 Un circuit est constitué de deux fils conducteurs rec- tilignes disposés à 90,0° et reliés à un demi-arc de cercle dont le rayon est R, comme le montre la figure 8.45. Le circuit est parcouru par un courant i dans le sens horaire. Calculez le champ magnétique au point P, situé au centre du demi-arc de cercle. FIGURE 8.41 • Problème 3 P4 Quatre fils rectilignes forment un circuit en rectangle de 65,0 cm sur 45,0 cm, comme le montre la figure 8.42. Un courant i = 3,00 A y circule dans le sens horaire. Quel est le champ magnétique au centre du circuit ? FIGURE 8.45 • Problèmes 7 et 8 286 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES P8 Un circuit est constitué de deux fils conducteurs recti- E13 Deux longs fils rectilignes parallèles sont distants de lignes disposés à 90,0° et reliés à un demi-arc de cercle dont le rayon est R = 20,0 cm, comme le montre la figure 8.45. Le circuit est parcouru par un courant i = 400 mA dans le sens horaire. Calculez le champ magnétique au point P, situé au centre du demi-arc de cercle. 3,0 cm (voir la figure 8.50). Ils sont traversés par les courants i1 = 3,0 A et i2 = 5,0 A, de sens opposés. À quel endroit, autre qu'à l'infini, le champ magnétique est-il nul ? P9 Un très long fil forme un cercle de rayon R = 15,0 cm à son centre (voir la figure 8.46). Le champ magnétique au centre du cercle est Quel est le courant dans le fil et quel est le sens du courant dans le cercle ? FIGURE 8.50 • Exercice 13 E14 Deux fils infinis parallèles sont séparés d'une distance d. Ils sont parcourus par un même courant i, circulant en sens opposé (voir la figure 8.51).

Quel est le champ magnétique au point P, situé à la position y = R ? FIGURE 8.46 • Problème 9 Section 8.3 Le champ magnétique d'un fil infini Q10 Deux très longs fils parallèles sont parcourus par un même courant i, comme le montre la figure 8.47. Classez par ordre croissant le module du champ magnétique des trois points illustrés. FIGURE 8.47 • Question 10 Q11 Deux très longs fils parallèles sont parcourus par des courants i de sens opposés, comme le montre la figure 8.48. Classez par ordre croissant le module du champ magnétique des trois points illustrés. FIGURE 8.51 • Exercices 14 et 15 E15 Deux fils infinis parallèles sont séparés d'une dis- tance d = 4,00 cm. Ils sont parcourus par un même courant i = 7,50 A, circulant en sens opposé (voir la figure 8.51). Quel est le champ magnétique au point P, situé à la position y = 6,00 cm ?

P16 Deux deux longs fils sont parallèles à l'axe des x et sont placés à une distance d de chaque côté de l'origine, comme le montre la figure 8.52. Un point P est placé à la coordonnée y sur l'axe des y. a. Quel est le champ magnétique au point P ? b.

Pour quelle position du point P, sur l'axe des y, le champ magnétique a-t-il un module maximal ? c. Quel est le module maximal du champ magnétique ? FIGURE 8.48 • Question 11 E12 Deux longs fils, parcourus par un courant i1 = 6,0 A et i2 = 3,0 A respectivement, sont séparés de 2,5 cm dans le plan des xy (voir la figure 8.49). Le fil 1 est à y1 = 3,0 cm, et le fil 2 est au-dessus du premier fil. À quel endroit, autre que l'infini, le champ magnétique est-il nul ? FIGURE 8.52 • Problème 16 P17 Un système est constitué de trois très longs fils, comme FIGURE 8.49 • Exercice 12 le montre la figure 8.53. Le premier fil transporte un courant i1 = 5,00 A dans le même sens que l'axe des x, et il coupe le plan des yz à la coordonnée (0,00 ; −20,0 ; −15,0) cm. Le deuxième fil transporte un courant i2 = 4,00 A dans le sens opposé à l'axe des x, et il coupe le plan des yz à la coordonnée (0,00 ; 20,0 ; −15,0) cm. Le troisième fil est parcouru par un courant i3 = 3,00 A dans le même sens que l'axe des y, et il est situé à une distance de 15,0 cm au-dessus de QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 287 l'axe des y. Quel est le champ magnétique au point P, situé à l'origine ? FIGURE 8.56 • Exercice 20 E21 Le module du champ magnétique à une distance de 20,0 cm d'un petit barreau aimanté est de 0,56 μT. FIGURE 8.53 • Problème 17 a. Quel est le module du moment magnétique du barreau ? Section 8.4 Les boucles de courant et les dipôles magnétiques b. Quel serait le courant dans une boucle de courant ayant 1,00 cm de rayon qui aurait le même moment dipolaire ? Q18 La figure 8.54 montre quatre situations où une boucle P22 Deux boucles de 26,0 mm de rayon sont parallèles au de courant est placée au-dessus d'un barreau aimanté. Dans chaque situation, déterminez le sens : plan des yz et sont distantes de 54,0 mm. Les boucles sont toutes les deux parcourues par un courant de 1,60 A, circulant dans le même sens (voir la figure 8.57). L'axe des x passe par le centre des boucles. Quel est le champ magnétique au point P, dont la coordonnée est x = 13,3 cm ? (Indice: l'approximation du dipôle n'est pas valide.) a. du moment magnétique de la boucle ; b. de la force magnétique exercée sur la boucle par le barreau aimanté. (i) (ii) (iii) (iv) FIGURE 8.54 • Question 18 FIGURE 8.57 • Exercice 22 Q19 Deux boucles conductrices identiques, parcourues P23 Un agencement est constitué de deux bobines coaxiales, par un courant i, sont placées de façon parallèle. L'axe des x passe par le centre des deux boucles, et l'axe des y est à mi-chemin entre les deux boucles. Tracez qualitativement la composante Bx en fonction de la position sur l'axe des x si les courants circulent en sens opposés (voir la figure 8.55). ayant chacune un rayon R et N spires. Elles sont séparées par une distance s, et un courant i circule dans le même sens. Ce dispositif a la particularité de produire un champ magnétique qui varie très peu pour les points près du point P, situé à mi-chemin entre les bobines (voir la figure 8.58). a. Calculez le champ magnétique au point P, situé à la coordonnée y.

b. Montrez que la dérivée dBy /dy est nulle pour y = s/2 (le point à mi-chemin entre les bobines). c. Montrez que la dérivée seconde du champ magnétique (d2By /dy2 = 0) pour y = R/2 lorsque la distance entre les bobines est s = R. FIGURE 8.55 • Question 19 Pour s = R, l'agencement est appelé une bobine d'Helmholtz. Le champ magnétique varie très peu au centre de la bobine d'Helmholtz. E20 Une bobine de 275 spires a un rayon de 4,2 cm, et elle est située dans le plan des xy. La bobine est parcourue par un courant de 2,7 A qui circule dans le sens horaire (voir la figure 8.56). a. Quel est le moment magnétique de la bobine ? b. Quel est le champ magnétique à une distance de 1,20 m au-dessus de la bobine sur son axe ? FIGURE 8.58 • Problème 23 288 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Section 8.5 Le théorème d'Ampère E27 Le champ magnétique dans une région est uniforme, Q24 Le champ magnétique est uniforme dans une région. et son module est B = 0,45 T. La figure 8.62 illustre un parcours d'intégration fermé, en forme de triangle rectangle isocèle. Calculez l'intégrale curviligne pour les parcours suivants : On veut calculer l'intégrale curviligne du champ magnétique pour trois parcours différents, ayant la même longueur et illustrés à la figure 8.59. Classez les parcours selon un ordre croissant de l'intégrale curviligne a. de a à b ; b. de b à c ; c. de c à a ; d. pour le parcours fermé abca.

FIGURE 8.59 • Question 24 Q25 La figure 8.60 montre quatre très longs fils, dans les- quels circulent des courants i identiques, entrant dans la page ou sortant de la page.

Classez les parcours d'intégration illustrés selon un ordre croissant (du plus négatif au plus positif) de la valeur de l'intégrale curviligne FIGURE 8.62 • Exercice 27 E28 Une bobine toroïdale comporte 300 spires. Son rayon intérieur est de 5,00 cm et son rayon extérieur, de 10,0 cm. Quel est le courant dans la bobine si le champ magnétique a un module de 2,50 mT à une distance de 6,00 cm du centre de la bobine ? P29 Un cylindre creux, de 0,620 cm de rayon interne et FIGURE 8.60 • Question 25 Q26 La figure 8.61 montre une coupe transversale d'un câble coaxial, constitué d'un cylindre central et d'une coquille cylindrique extérieure qui partagent le même axe. Un courant i sortant de la page est uniformément distribué sur la section du cylindre central ; un même courant i, entrant dans la page, est distribué uniformément dans la section de la coquille cylindrique extérieure. La figure montre aussi quatre parcours d'intégration circulaire, de rayons croissants. Classez par ordre croissant les parcours d'intégration selon le résultat de l'intégrale curviligne de 1,84 cm de rayon externe, transporte un courant de 5,00 A, réparti uniformément dans sa section. Calculez le module du champ magnétique : a. à une distance de 1,26 cm du centre du cylindre ; b. à une distance de 2,00 cm du centre du cylindre. P30 Un câble coaxial est constitué d'un cylindre intérieur, de rayon a, et d'une coquille cylindrique, de rayon intérieur b et de rayon extérieur c (voir la figure 8.63 qui montre une section transversale). Un courant i est uniformément distribué dans la section du cylindre intérieur. Le même courant i est distribué uniformément dans la section de la coquille cylindrique extérieure, mais ce courant circule en sens inverse du courant dans le cylindre intérieur. Calculez le module du champ magnétique pour les distances suivantes, par rapport à l'axe du câble : a. r < a ; b. a < r < b ; c. b < r < c ; FIGURE 8.61 • Question 26 d. r > c. QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 289 FIGURE 8.63 • Problèmes 30 et 31 FIGURE 8.65 • Problème 33 P31 Un câble coaxial est constitué d'un cylindre intérieur, de P34 Un très long fil de rayon R est parcouru par un cou- rayon a = 1,50 mm, et d'une coquille cylindrique, de rayon intérieur b = 3,00 mm et de rayon extérieur c = 3,60 mm (voir la figure 8.63 qui montre une section transversale). Un courant i = 0,600 A est uniformément distribué dans la section du cylindre intérieur. Le même courant i est distribué uniformément dans la section de la coquille cylindrique extérieure, mais ce courant circule en sens inverse du courant dans le cylindre intérieur. Calculez le module du champ magnétique pour les distances r suivantes, par rapport à l'axe du câble : rant qui n'est pas uniformément distribué. Le module de la densité de courant est une fonction de la distance r à partir du centre du fil : a. Quel est le module du champ magnétique à une distance r < R?

b. Quel est le module du champ magnétique à une distance r > R? a. r = 1,00 mm ; b. r = 2,00 mm ; c. r = 3,50 mm ; d. r = 4,00 mm. P32 Un système est composé d'un très grand nombre de longs fils parallèles juxtaposés dans un même plan (voir la figure 8.64). Il y a n fils par unité de largeur. Si chaque fil transporte un courant i, montrez, à l'aide du théorème d'Ampère, que le module du champ magnétique à une distance d au-dessus du plan est Section 8.6 Le champ magnétique produit par les solénoïdes Q35 Le tableau suivant donne la longueur, le nombre de spires et le courant circulant dans quatre solénoïdes. Classer les modules des champs magnétiques au centre des solénoïdes selon un ordre croissant. solénoïde longueur spires courant 1 L N i 2 2L N 2i 3 L 2N 2i 4 L N 2i E36 Un solénoïde idéal a une longueur de 60,0 cm et un FIGURE 8.64 • Problème 32 rayon de 3,00 cm. Il possède 700 spires. Quel est le courant dans le solénoïde si celui-ci produit un champ magnétique dont le module est de 12,0 mT ? E37 Un solénoïde idéal a une longueur de 1,20 m et un P33 La figure 8.65 montre deux longs cylindres parallèles, de rayon R = 3,00 cm, séparés d'une distance d = 10,0 cm. Le courant circulant dans le premier cylindre est i1 = 8,00 A, et le courant circulant dans le deuxième cylindre est i2 = 6,00 A. Les courants circulent dans le même sens.

Calculez le module du champ magnétique à une distance r = 2,00 cm par rapport au centre du premier cylindre. diamètre de 10,0 cm. Il produit un champ magnétique de 24,0 mT lorsqu'il est parcouru par un courant de 12,0 A. Calculez la longueur du fil du solénoïde. P38 Un solénoïde idéal de 4,40 cm de rayon comporte 360 spires jointives. Le solénoïde est fait d'un fil de cuivre de 1,02 mm de diamètre. On branche le solénoïde à une batterie de 9,00 V. 290 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES a. Quelle est la résistance du solénoïde ? b. Quel est le module du champ magnétique au centre du solénoïde ? P39 Un long solénoïde a un rayon de 10,0 cm et possède 650 spires/m. Il est parcouru par un courant de 0,450 A, qui circule en sens antihoraire, selon une vue en plongée. On insère un long fil rectiligne dans lequel circule un courant de 20,0 A vers le haut. Le fil coïncide avec l'axe du solénoïde. On suppose que l'axe des z a la même orientation que le courant dans le fil et que l'origine du système de coordonnées cartésiennes est placée au centre du solénoïde. Calculez le champ magnétique aux endroits suivants : Il est parcouru par un courant de 2,50 A. Calculez le champ magnétique produit aux endroits suivants : a. à z = 17,5 cm ; b. à z = 35,0 cm ; c. à z = 52,5 cm. a. à la position b. à la position P40 Un solénoïde de 200 spires/cm a une longueur L = 35,0 cm et un diamètre de 42,0 mm (voir la figure 8.66). FIGURE 8.66 • Problème 40 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 291 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 8.1 Le champ est sortant. Selon la règle de la main droite, on place le pouce selon le sens du courant. Les lignes de champ tournent selon le sens des doigts. Lorsqu'un point est situé sous le fil, les doigts sortent de la page. 8.2 a. i2 est sortant. Selon la règle de la main droite, le courant i1 produit un champ vers le haut. Le champ produit par le courant i2 doit être vers le bas pour que le champ résultant soit nul au point P. Ceci est possible si i2 est sortant.

b. i1 Pour que le champ résultant soit nul, il faut que B1 = B2. Le module du champ magnétique diminue lorsque la distance augmente. Comme le fil 1 est plus éloigné du point P que le fil 2, il faut que i1 > i2 pour que les deux modules soient égaux. 8.3 B(i) > B(iii) > B(ii) Selon la règle de la main droite pour les boucles de courant, les champs sont dans le même sens dans la situation (i), alors qu'ils sont de sens opposés dans la situation (ii). Donc, les modules vont s'additionner dans la situation (i) et se soustraire dans la situation (ii). La situation (iii) a un seul champ, dont le module se trouve entre les modules dans les autres situations. 8.4 (iii) < (i) < (ii) Selon le théorème d'Ampère, la circulation est donnée par μ0 iinc. D'après la règle de la main droite (on enroule les doigts selon le sens du parcours d'intégration, et le pouce donne le sens positif pour le courant), le courant entrant est positif et le courant sortant est négatif. Pour la boucle 1, iinc = −i + i = 0. Pour la boucle 2, iinc = i et pour la boucle 3, iinc = −i. Chapitre 292 La force magnétique Buts du chapitre Ce chapitre traite de la force magnétique exercée sur les particules chargées et les fils. Après l'étude de ce chapitre, vous serez en mesure : • de calculer la force magnétique sur une particule chargée et sur un courant électrique ; • d'étudier la trajectoire d'une particule chargée dans un champ magnétique ; • de calculer le moment de force exercé sur un dipôle magnétique ; • de comprendre l'effet Hall ; • de comprendre la façon dont se comporte un matériau dans un champ magnétique. Préalables Ce chapitre porte sur la force magnétique, qui a des points communs avec la force électrique. Revoyez : • la force magnétique entre les aimants, présentée à la section 8.1 ; • le mouvement de particules chargées dans un champ électrique, analysé à la section 2.7 et les dipôles électriques, étudiés à la section 2.8 ; • la conduction, décrite à la section 6.2 ; • la dynamique du mouvement circulaire, analysée à la section 7.1 du tome 1 ; • le moment du force, expliqué à la section 12.1 du tome 1.

293 Une aurore polaire est causée par des particules chargées qui sont déviées par le champ magnétique terrestre. 294 CHAPITRE 09 — La force magnétique Au chapitre précédent, nous avons vu qu'un courant électrique produit un champ magnétique. La prochaine étape consiste à calculer la force exercée par un champ magnétique. La force magnétique est exercée d'abord sur les particules chargées en mouvement. En effet, les protons et les électrons subissent une force magnétique lorsqu'ils se déplacent dans un champ magné tique. Le champ magnétique terrestre exerce une force magnétique sur les parti cules chargées qui viennent du Soleil (le vent solaire) et de l'espace (les rayons cosmiques).

Sans le champ magnétique terrestre, notre planète serait bombar dée par ces particules. Nous verrons dans le chapitre que le champ terrestre les fait dévier selon une trajectoire en spirale. Dans certaines situations, des parti cules entrent en collision avec les molécules de l'atmosphère près des pôles, ce qui produit les aurores polaires, comme celle qui apparaît sur la photographie en début de chapitre. La force magnétique est très utile pour faire dévier des particules chargées. Dans les écrans à rayons cathodiques des anciens téléviseurs, un faisceau d'élec trons est dévié pour produire une image. De même, dans des grands accélé rateurs de particules, des protons se déplacent à très grande vitesse le long d'un large cercle grâce à la force magnétique. Nous avons vu au chapitre 6 qu'un courant électrique est constitué de charges électriques en mouvement. Ces charges subissent une force magnétique lorsqu'un courant se trouve dans un champ magnétique, ce qui permet entre autres de connaître le signe et la densité des porteurs de charge, au moyen de ce qu'on appelle l'effet Hall. De plus, on observe une force magnétique sur les fils parcourus par des cou rants. La force magnétique a plusieurs applications qui vont du moteur élec trique au hautparleur. Cette force est aussi utilisée pour définir l'ampère, l'unité de mesure du courant électrique.

9.1 La force magnétique sur une charge en mouvement Prenons par exemple une particule, dont la charge est q, qui se déplace à une vitesse dans un champ magnétique . Le champ magnétique peut être produit par un aimant ou un courant électrique. La particule subit une force magnétique qui dépend de la charge et du champ magnétique, mais aussi de la vitesse de la particule.

La figure 9.1 présente trois situations pour une charge (a) (b) FIGURE 9.1 (a) La force magnétique est nulle lorsque et sont parallèles. (b) La force magnétique est perpendiculaire à et à . (c) La force magnétique est maximale lorsque et sont perpendiculaires. (c) 9.1 — La force magnétique sur une charge en mouvement 295 positive. En particulier, la force magnétique est nulle lorsque la vitesse et le champ ont la même direction. De plus, la force est toujours perpendiculaire à la vitesse et au champ. Dans la figure 9.2, on compare l'orientation dans le cas d'une charge positive et d'une charge négative ayant la même vitesse. La force magnétique sur la charge négative est opposée à la force magnétique sur la charge positive. Les expériences montrent que le module de la force est FIGURE 9.2 (9.1) La force magnétique sur une charge négative est opposée à la force sur une charge positive. où 0 ≤ f ≤ 180° représente l'angle entre la vitesse et le champ magnétique. On voit que le module a la forme du module d'un produit vectoriel.

De plus, la force est perpendiculaire à la vitesse et au champ magnétique. La force magnétique est obtenue au moyen d'un produit vectoriel : (9.2) × Force magnétique Pour une charge positive, on obtient le sens de à l'aide de la règle de la main droite pour le produit vectoriel (voir la figure 9.3) : on place les doigts de la main droite dans le sens du vecteur . On place la main pour pouvoir tourner les doigts vers le vecteur . Le pouce donne le sens de dans le cas d'une charge positive. Si la charge est négative, selon l'équation 9.2, le sens de la force est opposé au sens du vecteur × , donc opposé au sens du pouce. En résumé, la force magnétique sur une particule chargée a les propriétés suivantes. • La force magnétique est nulle si la vitesse est nulle ou si la vitesse a la même direction que le champ magnétique (f = 0 ou f = 180°). • Le module de la force est Fm = |q|vB sin f.

• La force est perpendiculaire au plan formé par les vecteurs et . • Le sens de la force magnétique est obtenu par la règle de la main droite. Le sens de la force est le même que le pouce dans le cas d'une charge positive, et il est opposé au sens du pouce dans le cas d'une charge négative. L'équation 9.1 permet d'exprimer le tesla en fonction des autres unités du Système international : FIGURE 9.3 Le sens de la force magnétique sur une charge positive est donnée par la règle de la main droite. 296 CHAPITRE 09 — La force magnétique EXEMPLE 9.1 La force magnétique sur un électron Un électron se déplace à une vitesse champ magnétique est dans une région où le . Quelle est l'accélération subie par l'électron ? La deuxième clé est la deuxième loi de Newton : SOLUTION Illustrer la situation La figure 9.4 illustre la situation, avec le vecteur le vecteur . et (ii) Résoudre le problème Nous calculons d'abord la force magnétique : × Le produit × , alors que × . La force magnétique est donc en sens opposé à l'axe des z : FIGURE 9.4 Le schéma de la situation pour l'exemple 9.1 (iii) Décortiquer le problème La charge de l'électron est q = −e. La masse de l'électron est indiquée dans l'annexe B. La force magnétique est la seule force exercée sur l'électron (la force gravitationnelle est négligeable).

Nous insérons le résultat de l'équation (iii) dans l'équation (ii) : (réponse) Valider la réponse Identifier les clés La première clé est l'équation 9.2 qui permet de calculer la force magnétique : (i) × En se basant sur le schéma, nous pouvons vérifier, à l'aide de la règle de la main droite, que × , ce qui implique que est orientée selon , étant donné que la charge de l'électron est négative. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 9.1 La figure suivante montre trois situations où une particule chargée se déplace dans un champ magnétique. Pour chaque situation, indiquez l'orientation de la force magnétique. a. b. c. 9.2 — Le mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique 9.2 297 Le mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique Les trajectoires circulaires Prenons une particule ayant une charge q lancée à une vitesse dans une région où il y a un champ magnétique uniforme (produit par exemple par un long solénoïde), perpendiculaire à la vitesse de la particule. La figure 9.5 montre une telle situation pour une charge positive et un champ entrant dans la page. Selon la règle de la main droite, la force est perpendiculaire à la vitesse (voir la figure 9.5). Cette force perpendiculaire est donc une force centripète, car l'accélération qui en résulte est perpendiculaire à la vitesse. Ceci est un résultat important. La force magnétique sur une particule chargée en mouvement est une force centripète, car elle est toujours perpendiculaire à la vitesse.

La force magnétique ne change pas le module de la vitesse d'une particule chargée. FIGURE 9.5 Le travail d'une force magnétique sur une particule chargée est toujours nul, car cette force est toujours perpendiculaire à la vitesse, donc perpendiculaire au déplacement. Le champ magnétique ne peut pas changer l'énergie cinétique d'une particule. Une charge positive décrit un mou vement circulaire lorsqu'elle se dé place perpendiculairement à un champ magnétique uniforme. L'orientation de la vitesse change à cause de l'accélération, ce qui fait changer l'orientation de la force. La particule décrit un cercle de rayon r. On peut appliquer la deuxième loi de Newton selon la direction centripète (voir le chapitre 7 du tome 1) pour trouver le rayon de la trajectoire : (9.3) où p = mv est le module de la quantité de mouvement de la particule. Le rayon de la trajectoire est proportionnel à la quantité de mouvement de la particule.

Cette configuration est utilisée dans les accélérateurs de particules pour mesurer la quantité de mouvement des particules produites lors d'une collision : on applique un champ magnétique uniforme et on mesure le rayon de la trajectoire (voir la figure 9.6).

Dans le cas d'une particule de charge négative, la force est opposée, et la particule va tourner dans l'autre sens. De plus, il est possible d'utiliser un champ magnétique pour mesurer la masse d'une particule si on connaît déjà le module de la vitesse. Nous verrons bientôt le fonctionnement d'un spectromètre de masse basé sur cette configuration. La fréquence du mouvement circulaire (l'inverse de la période) peut être calculée : (9.4) Ceci est un résultat très intéressant : la fréquence ne dépend pas du module de la vitesse. Si la vitesse de la particule augmente, le rayon de la trajectoire augmente, mais le temps pour effectuer une révolution ne change pas. FIGURE 9.6 Les traces de deux électrons (en vert) et d'un positron (en rouge) qui se déplacent dans un champ magnétique entrant dans la page.

298 CHAPITRE 09 — La force magnétique EXEMPLE 9.2 Le résultat d'une désintégration Un noyau radioactif se désintègre en émettant une particule alpha, ayant une énergie cinétique de 6,50 MeV.

La particule alpha se déplace horizontalement. Elle entre dans un champ magnétique perpendiculaire à sa vitesse, orienté vers le haut, et dont le module est de 0,800 T. a. Dans quel sens tourne la particule alpha, selon une vue en plongée ? b. Quel est le rayon de la trajectoire ? SOLUTION Illustrer la situation La particule alpha est un noyau d'hélium (42He) ayant une charge q = +2e. Dans une vue en plongée, un champ vers le haut correspond à un champ qui sort de la page. La figure 9.7 illustre la vitesse, le champ magnétique et la force obtenue à l'aide de la règle de la main droite. L'énergie cinétique permet de calculer le module de la vitesse de la particule alpha : SOLUTION a. Identifier la clé La clé est que la force magnétique est une force centripète, orientée vers le centre. Selon le schéma, la particule tourne en sens horaire. (réponse) FIGURE 9.7 Le schéma de la situation pour l'exemple 9.2 Décortiquer le problème SOLUTION b. Identifier la clé Comme la vitesse est perpendiculaire au champ magnétique, la trajectoire est circulaire et le rayon est donné par l'équation 9.3 : (i) Résoudre le problème Nous remplaçons les valeurs dans l'équation (i) : L'annexe B est utile pour obtenir les données de la particule alpha et les facteurs de conversion. Nous devons exprimer les paramètres dans le SI avant de faire les calculs. Ainsi, (réponse) Valider la réponse La module de la vitesse de la particule alpha représente environ 6 % de la vitesse de la lumière. Nous pouvons donc utiliser la mécanique newtonienne (avec K = mv2 /2) pour analyser son mouvement. Ceci est correct tant que le module de la vitesse de la particule ne dépasse pas environ 10 % de la vitesse de la lumière. Le rayon obtenu peut être mesuré facilement. 9.2 — Le mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 9.2 La figure ci-contre montre deux trajectoires circulaires de particules dans un champ magnétique uniforme, perpendiculaire à la page. Les charges ont le même module de vitesse et des charges |q1| = |q2|. a. Quelle particule a la plus petite masse ? b. Quelle particule a une charge positive ? Le mouvement hélicoïdal De nouveau, on étudie le mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme. Cette fois-ci, la vitesse n'est pas perpendiculaire au champ magnétique, mais elle forme un angle φ par rapport au champ (voir la figure 9.8). La composante de la vitesse parallèle au champ ne change pas, alors que la composante perpendiculaire de la vitesse va changer d'orientation, selon les résultats obtenus dans la dernière sous-section.

La trajectoire est une hélice, c'est-à-dire la superposition d'un mouvement circulaire perpendiculairement au champ et un mouvement uniforme parallèlement au champ. Pour faire l'analyse, on trace un système de coordonnées cartésiennes avec l'axe des z parallèle au champ magnétique, de telle sorte que . On décompose ensuite la vitesse en une composante tangentielle (dans le plan des xy) et une composante z : (9.5) La projection de l'hélice dans le plan des xy correspond à un mouvement circulaire. On obtient le rayon du cercle de la même façon que pour l'équation 9.3, en remplaçant v par vθ = v sin φ dans l'accélération centripète : (9.6) (9.7) De nouveau, la fréquence du mouvement circulaire ne dépend pas du module de la vitesse : La composante vz est constante, car la force et l'accélération sont toujours perpendiculaires au champ magnétique. On définit le pas de l'hélice p comme la distance, perpendiculairement au cercle, lorsque la particule a effectué une révolution. La composante z du mouvement est un mouvement uniforme, et le temps pour effectuer une révolution correspond à la période T = 1/f.

Alors, (9.8) FIGURE 9.8 Le mouvement hélicoïdal d'une charge positive dans un champ magnétique, avec un rayon r et un pas p 299 300 CHAPITRE 09 — La force magnétique EXEMPLE 9.3 Un proton dans une hélice Un proton ayant une énergie cinétique de 10,5 keV se déplace dans un champ magnétique. Le module du champ magnétique est de 7,40 mT, et il forme un angle de 75,0° par rapport à la vitesse du proton. Quel est le pas de l'hélice du mouvement du proton dans le champ magnétique ? SOLUTION Décortiquer le problème Identifier la clé La clé pour trouver le pas est l'équation 9.8 : (i) où f est donnée par l'équation 9.4 : (ii) L'énergie cinétique doit être convertie en joules pour effectuer les calculs : Résoudre le problème L'énergie cinétique permet de calculer le module de la vitesse du proton : Nous trouvons ensuite le pas de l'hélice : Nous calculons d'abord la fréquence : (réponse) Valider la réponse L'ordre de grandeur semble correct.

Le mouvement dans un champ magnétique non uniforme Lorsqu'une particule chargée se déplace dans un champ magnétique non uniforme, la trajectoire est complexe et très difficile à calculer. La force magnétique exercée sur la particule est perpendiculaire à la vitesse de cette dernière et au champ magnétique présent vis-à-vis de la position de la particule. Ceci produit une trajectoire qui forme des spirales autour des lignes de champ magnétique. La figure 9.9 montre une configuration, appelée bouteille magnétique, utilisée pour confiner un plasma* à haute température. Dans cette configuration, on place deux bobines identiques, parcourues par un courant i. Le champ magnétique est intense près des bobines et plus faible à mi-chemin. Les particules chargées qui se déplacent dans l'espace autour des bobines ont des * Un plasma est un état de la matière dans lequel une partie des atomes est ionisée. 9.3 — Quelques applications liées à la force magnétique FIGURE 9.9 FIGURE 9.10 Une particule est confinée par le champ magnétique d'une bouteille magnétique. Les bobines aux deux extrémités sont des miroirs magnétiques. Les ceintures de radiation de Van Allen 301 trajectoires en spirale autour des lignes de champ. Aux extrémités, le champ plus intense produit une réflexion des particules. Les particules sont alors confinées dans un espace autour des bobines. Chaque bobine se comporte comme un miroir magnétique qui réfléchit les particules chargées par son champ magnétique. Le champ magnétique terrestre se comporte un peu comme une bouteille magnétique. En effet, autour de la Terre, des particules chargées (surtout des protons et des électrons) se déplacent entre les deux pôles magnétiques, le long de spirales autour des lignes de champ magnétique terrestre. Elles forment les ceintures de radiation de Van Allen (voir la figure 9.10), de forme toroïdale. Elles ont été découvertes en 1958 par le physicien et astronome américain James Alfred Van Allen (1914-2006). Au cours d'un orage solaire, le Soleil éjecte des particules chargées (surtout des protons), qui constituent le vent solaire. Un vent solaire important modifie la ceinture de Van Allen, et certaines des particules ne sont pas réfléchies par le champ magnétique terrestre. Ces particules entrent alors en collision avec les atomes de l'ionosphère (des atomes d'oxygène, d'azote et d'hydrogène).

Les collisions excitent les atomes. En se désexcitant, les atomes émettent de la lumière, phénomène lumineux appelé aurore polaire (voir la figure 9.11). 9.3 FIGURE 9.11 Une aurore australe captée par un satellite Image de la NASA, superposée à une image de la Terre Voir la vidéo d'une aurore australe captée par la NASA. Quelques applications liées à la force magnétique Une particule chargée peut se déplacer dans une région où il y a à la fois un champ électrique et un champ magnétique. La force exercée sur la particule est $\times$ (9.9) Cette force est appelée force de Lorentz, en l'honneur du physicien néerlandais Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), qui a étudié en profondeur l'électromagnétisme, la lumière et la relativité. Force de Lorentz 302 CHAPITRE 09 — La force magnétique Une configuration intéressante consiste à établir un champ électrique uniforme et un champ magnétique uniforme perpendiculairement au champ électrique. C'est ce qu'on appelle des champs croisés. Le champ électrique uniforme peut être produit par deux grandes plaques parallèles, et le champ magnétique uniforme peut l'être par un long solénoïde. Les deux champs sont facilement modifiables. Le sélecteur de vitesse Un sélecteur de vitesse est un montage qui utilise des champs croisés. Comme son nom l'indique, il permet de sélectionner des particules chargées ayant une vitesse bien déterminée.

La figure 9.12a illustre ces champs. On envoie une particule chargée avec une vitesse perpendiculaire aux champs. (a) Dans la situation de la figure 9.12, la particule subit une force électrique vers le haut et une force magnétique vers le bas (voir la figure 9.12b) : (b) La force est nulle si la vitesse de la particule est FIGURE 9.12 (a) Une particule chargée se déplace vers un sélecteur de vitesse. (b) Les forces exercées sur la particule dans le sélecteur de vitesse. EXEMPLE 9.4 (9.10) Avec une force résultante nulle, la particule continue en ligne droite et passe à travers la fente.

Si le module de la vitesse est plus faible, la force magnétique est plus faible que la force électrique, et la particule aura une accélération vers le haut. Elle ne passera pas à travers la fente. Si le module de la vitesse est plus élevé, la force magnétique est plus grande que la force électrique, et la particule subit une accélération vers le bas. Elle ne passera pas non plus à travers la fente.

Si la charge est négative, les deux forces sont inversées, mais la condition pour que la particule passe à travers la fente reste inchangée. Un proton dans un sélecteur de vitesse Des protons sont accélérés à partir du repos par une différence de potentiel $\Delta V = 5{,}00$ kV. Ils sont ensuite envoyés dans un sélecteur de vitesse en se déplaçant vers la gauche. Comme le montre la figure suivante, le champ électrique est orienté vers le bas, et son module est de 9,60 kV/m. Quel est le champ magnétique pour que les protons se déplacent en ligne droite dans le sélecteur de vitesse ? 9.3 — Quelques applications liées à la force magnétique 303 SOLUTION Illustrer la situation La figure 9.13 montre le diagramme des forces d'un proton lorsque celui-ci est dans le sélecteur de vitesse. Pour que le proton se déplace en ligne droite, il faut que la force magnétique soit opposée à la force électrique, qui est vers le bas. (i) La deuxième clé est que la force de Lorentz doit être nulle pour que les protons se déplacent en ligne droite : $\times$ (ii) FIGURE 9.13 Le diagramme des forces pour le proton Résoudre le problème Nous calculons d'abord le module de la vitesse des protons après l'accélération : Décortiquer le problème Pour accélérer le proton, la plaque de gauche de l'accélérateur doit être chargée négativement, et la plaque de droite doit être chargée positivement. La différence de potentiel pour le parcours du proton est donc négative. Ensuite, nous insérons ce résultat dans l'équation (ii) : Le champ magnétique est donc (réponse) Selon la règle de la main droite pour le produit vectoriel, le champ magnétique doit être sortant de la page pour que la force magnétique soit vers le haut. Identifier les clés La première clé est la conservation de l'énergie mécanique durant l'accélération (voir l'équation 4.12 de la page 127) : Valider la réponse Le champ magnétique nécessaire est de l'ordre de grandeur obtenu au chapitre 8. La vitesse du proton est beaucoup plus faible que la vitesse de la lumière, ce qui nous permet d'utiliser la mécanique newtonienne. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 9.3 La figure suivante montre trois protons qui se déplacent dans une région où il y a un champ électrique et un champ magnétique croisés.

Les trois protons ont des vitesses $v < E/B$, ayant le même module. Classez les protons selon un ordre décroissant du module de la force résultante qu'ils subissent. 304 CHAPITRE 09 — La force magnétique Le spectromètre de masse Un spectromètre de masse est un appareil qui permet de mesurer la masse des atomes et des molécules. Il en existe plusieurs types. La figure 9.14 montre le schéma d'un spectromètre de masse utilisant la déviation des particules chargées par un champ magnétique. Au départ, une source produit des ions à partir des atomes dont on veut connaître la masse. La charge q des ions est connue. Les ions passent à travers un sélecteur de vitesse (avec un champ électrique et un champ magnétique , l'indice sv désignant le sélecteur de vitesse), ce qui produit un faisceau d'ions ayant la même vitesse : La troisième partie est une région où règne un champ magnétique uniforme perpendiculaire à la vitesse des ions. Les ions décrivent des demi-cercles de rayon r, donné par l'équation 9.3 : Les ions sont alors détectés, ce qui permet de mesurer le diamètre 2r des trajectoires. On peut alors isoler la masse des ions : Si l'atome possède plusieurs isotopes, la masse de chaque isotope est mesurée séparément.

En effet, chaque isotope a une trajectoire différente, avec un rayon proportionnel à sa masse. Les isotopes arrivent donc sur le détecteur à des positions différentes. FIGURE 9.14 Un spectromètre de masse utilisant la déviation par un champ magnétique Le cyclotron et le synchrotron Pour connaître les interactions et les constituants de la matière à très petite échelle, les physiciens produisent des collisions de particules à très haute énergie.

Ces particules doivent être accélérées dans des accélérateurs de particules. Un champ magnétique ne peut pas accélérer une particule chargée, car la force magnétique est toujours perpendiculaire à la vitesse. Le travail de la force magnétique est toujours nul. On a donc besoin d'une force électrique pour accélérer les particules. Les accélérateurs de particules les plus simples sont des accélérateurs linéaires. Les particules chargées sont accélérées en ligne droite par une différence de potentiel d'accélération, comme c'est le cas dans l'exemple 9.4. Le cyclotron 9.3 — Quelques applications liées à la force magnétique est un accélérateur de particules qui utilise une déviation magnétique pour faire passer de nombreuses fois les particules chargées dans une région d'accélération. La figure 9.15a illustre les éléments importants d'un cyclotron. D'abord, une source d'ions ou de protons émet les particules qu'on veut accélérer. Les particules entrent à l'intérieur de conducteurs creux en forme de demi-cylindres qu'on appelle les dés (ils ont la forme de la lettre D). Les électro-aimants produisent un champ magnétique uniforme, de telle sorte que la trajectoire est circulaire. On applique une différence de potentiel alternative ΔV entre les dés, de façon que chaque fois que la particule sort d'un dé, le champ électrique est orienté pour accélérer la particule. On ajuste la fréquence de la différence de potentiel pour qu'elle soit égale à la fréquence du mouvement circulaire, donnée par l'équation 9.4 : (9.11) Selon la masse et la charge de la particule accélérée, on ajuste le champ magnétique produit par les électro-aimants pour que cette condition soit respectée. Comme la fréquence du mouvement circulaire ne dépend pas de la vitesse, la même fréquence d'oscillation est utilisée tout au long de l'accélération. (a) (b) FIGURE 9.15 (a) Le schéma d'un cyclotron. (b) Une vue en plongée de la trajectoire d'une particule positive dans le cyclotron.

La particule se déplace en spirale. À chaque demi-tour, sa vitesse augmente lorsqu'elle se déplace entre les dés. À l'intérieur des dés, elle ne subit l'influence que du champ magnétique, car les dés sont des conducteurs, puisque à l'intérieur d'un conducteur. Après un certain nombre de révolutions, la trajectoire a un rayon $r = R$ égal au rayon des dés. La particule sort du cyclotron.

Selon l'équation 9.3, Les cyclotrons ont d'abord été utilisés dans des recherches en physique nucléaire. De nos jours, on les utilise dans les recherches en physique médicale pour produire des isotopes médicaux et dans certains traitements contre le cancer (la hadronthérapie). Ces accélérateurs peuvent augmenter la vitesse des protons jusqu'à une énergie cinétique d'environ 25 MeV. À partir de cette énergie, la vitesse est suffisante pour que des effets relativistes diminuent la fréquence du mouvement circulaire. La fréquence d'oscillation n'est alors plus synchronisée avec le mouvement des particules. 305 306 CHAPITRE 09 — La force magnétique Pour obtenir des protons de plus grande énergie cinétique, il est possible de modifier la fréquence ou le champ magnétique lorsque les particules atteignent les bords du cyclotron, avec une vitesse relativiste, de telle sorte que l'énergie cinétique continue d'augmenter.

Le second problème des cyclotrons est lié à la taille. En effet, pour générer une grande énergie cinétique, on a besoin de très gros cyclotrons.

Ceci nécessite des électro-aimants de très grandes dimensions afin d'obtenir un champ magnétique sur une très grande surface. Le plus grand cyclotron est situé dans les laboratoires du TRIUMF (le Laboratoire national canadien pour la recherche en physique nucléaire et en physique des particules), à Vancouver. Ce cyclotron peut accélérer des protons jusqu'à une énergie cinétique de 500 MeV. Les deux difficultés sont résolues lorsque le cyclotron est remplacé par un synchrotron. Dans un synchrotron, les particules se déplacent à l'intérieur d'un anneau, sur une trajectoire circulaire, plutôt que sur une trajectoire en spirale. On fait varier graduellement le champ magnétique et la fréquence de la différence de potentiel d'accélération. Le champ magnétique existe seulement dans l'anneau plutôt que dans une grande région circulaire. Le plus grand accélérateur du monde est le LHC (Large Hadron Collider ou Grand collisionneur de hadrons). Il est constitué de deux synchrotrons qui accélèrent des protons (ou des ions lourds comme le plomb) en sens inverses. Les synchrotrons sont situés dans un tunnel de 26,659 km de circonférence, à environ 100 m de profondeur (voir la figure 9.16), entre la Suisse et la France. Les deux faisceaux se rencontrent à quatre endroits, où des grands détecteurs sont placés pour analyser les produits des collisions. À terme, le LHC devrait pouvoir accélérer les protons jusqu'à une énergie cinétique de 7 TeV dans chacun des synchrotrons. FIGURE 9.16 L'intérieur du tunnel du LHC 9.4 — L'effet Hall 9.4 L'effet Hall Dans les sections précédentes, nous avons vu que les électrons et les autres particules chargées sont déviés lorsqu'ils se déplacent dans un champ magnétique. Que se passe-t-il dans le cas des électrons d'un courant électrique à l'intérieur d'un conducteur ? Le physicien américain Edwin Herbert Hall (1855–1938) a découvert que le champ magnétique produit une différence de potentiel perpendiculairement au sens du courant et au sens du champ magnétique. L'effet Hall permet de vérifier le signe des porteurs de charge dans un conducteur. Il est très utile dans différents capteurs électroniques, entre autres pour mesurer le module du champ magnétique. Pour comprendre cet effet, on fait circuler un courant électrique dans un élément conducteur qui est placé dans un champ magnétique, comme le montre la figure 9.17. Le conducteur a une largeur h et une épaisseur d, ce qui fait que l'aire de sa section (perpendiculaire au courant) est $A = hd$. Le champ magnétique est perpendiculaire au sens du courant. Comme nous l'avons vu à la section 6.1, le courant électrique est produit lorsque des porteurs de charge se déplacent dans la même direction à une vitesse de dérive . Pour commencer, supposons que les porteurs de charge sont des particules positives, qui se déplacent à une vitesse de dérive dans le même sens que le sens du courant (voir la figure 9.18a, qui présente une vue de face). Les particules subissent une force magnétique vers le haut. Les particules positives vont se déplacer vers le haut en s'accumulant sur la surface supérieure, comme le montre la figure 9.18b. L'accumulation de charges positives produit un champ électrique , orienté vers le bas. Ce champ génère une force électrique vers le bas sur les porteurs de charge. On obtient rapidement une situation d'équilibre, avec une force résultante nulle. Les porteurs de charge se déplacent alors en ligne droite. Il y a une différence de potentiel, qu'on appelle la différence de potentiel de Hall ΔV_H, entre la surface supérieure (à un potentiel plus élevé) et la surface inférieure.

(a) (b) FIGURE 9.18 (a) Des porteurs de charge positive subissent une force magnétique vers le haut. (b) À l'équilibre, la surface du haut est à un potentiel plus élevé que la surface du bas. Regardons ce qui se passe maintenant si les porteurs de charge sont des particules négatives. Dans ce cas, les porteurs de charge se déplacent à l'opposé du sens du courant, avec une vitesse de dérive (voir la figure 9.19a à la page suivante). Ils subissent une force magnétique orientée vers le haut, ce qui produit FIGURE 9.17 Le montage pour produire l'effet Hall 307 308 CHAPITRE 09 — La force magnétique une accumulation de charges négatives sur la surface supérieure. Cette accumulation de charges génère un champ électrique vers le haut. Contrairement à la situation précédente, la surface supérieure est à un potentiel plus faible que la surface inférieure, comme le montre la figure 9.19. Donc, on peut connaître le signe des porteurs de charge en mesurant quelle surface a le potentiel le plus élevé, à l'aide d'un voltmètre. (a) (b) FIGURE 9.19 (a) Des porteurs de charge négative subissent une force magnétique vers le haut. (b) À l'équilibre, la surface du haut est à un potentiel plus faible que la surface du bas.

Lorsque l'élément conducteur est un bon conducteur, comme le cuivre, l'aluminium ou l'argent, on trouve que la surface du haut est à un potentiel plus faible.

Ceci confirme que les porteurs de charge sont des électrons. Pour certains métaux, comme le béryllium ou le zinc, on trouve que la surface supérieure a un potentiel plus élevé que la surface inférieure. Les porteurs de charge ne sont donc pas des électrons pour ces métaux. Afin de comprendre la conduction dans ces métaux, on doit recourir à un modèle de la conduction plus complexe. Ce modèle est le modèle des bandes, qui tient aussi compte du mouvement des trous, qui correspondent à l'absence d'électrons. Dans le cas de semiconducteurs, le résultat est encore plus complexe, car l'effet Hall est produit par le mouvement d'électrons de conduction et de trous. Toutefois, cette analyse dépasse le cadre de cet ouvrage. Nous supposons donc pour la suite que les porteurs de charge sont des électrons de conduction. Le champ électrique induit par l'accumulation de charges est uniforme si le champ magnétique l'est aussi. La différence de potentiel de Hall est alors (voir par exemple l'équation 4.11 de la page 126) : (9.12) À l'équilibre, la force électrique et la force magnétique ont le même module.

Comme le champ magnétique est perpendiculaire à la vitesse et que la charge de l'électron est $q = -e$, on obtient (9.13) Cette équation permet d'obtenir une valeur expérimentale du module de la vitesse de dérive à partir d'une mesure du champ magnétique, de la hauteur du conducteur d et de la différence de potentiel de Hall ΔV H. 9.4 — L'effet Hall Au chapitre 6, nous avons vu que le module de la vitesse de dérive est relié au courant i qui circule dans le conducteur. À partir de l'équation 6.5 de la page 193, on a où n est la densité de porteurs de charge. En insérant cette équation dans l'équation 9.13, on obtient (9.14) Donc, en mesurant la différence de potentiel de Hall lorsque le champ magnétique et l'épaisseur du conducteur sont connus, on peut obtenir une valeur expérimentale pour déterminer la densité de porteurs de charge. Au chapitre 6, nous avons supposé qu'un bon conducteur fournissait un électron de conduction par atome. On est maintenant en mesure d'obtenir une valeur plus exacte. Le tableau 9.1 donne les valeurs pour certains matériaux, qui ont été obtenues par effet Hall. TABLEAU 9.1 Les mesures par effet Hall de la densité de porteurs de charge, de leur signe et du nombre de porteurs de charge par atome n ($\times 10^{28}\ m^{-3}$) Signe Nombre par atome Aluminium 21 − 3,5 Antimoine 0,31 − 0,09 Argent 7,4 − 1,3 Béryllium 2,6 + 2,2 Cuivre 11 − 1,3 Potassium 1,5 − 1,1 Sodium 2,5 − 0,99 Zinc 19 + 2,9 Substance Dans le cas d'un matériau pour lequel n est connu, l'équation 9.14 permet d'obtenir le module d'un champ magnétique : Les capteurs à effet Hall sont des appareils électroniques qui mesurent la différence de potentiel de Hall à travers un conducteur connu et qui donne la mesure d'une composante du champ magnétique. MISE EN GARDE Évitez de confondre les dimensions h et d.

Pour calculer le module de la vitesse de dérive à l'aide de l'équation 9.13, on a besoin de la dimension d, qui est perpendiculaire au sens du courant et au champ magnétique. Pour calculer la densité de porteurs de charge, on a besoin de la dimension h, qui est parallèle au champ magnétique. 309 310 CHAPITRE 09 — La force magnétique EXEMPLE 9.5 La détection d'un champ magnétique Un capteur de champ magnétique utilise un circuit dans lequel un morceau de cuivre, illustré dans la figure ci-contre, est parcouru par un courant de 10,0 A, orienté dans le même sens que l'axe des x. La densité de porteurs de charge du cuivre est de $1{,}1 \times 10^{29}\ m^{-3}$. La différence de potentiel de Hall est de 5,8 μV. Le champ magnétique est orienté en direction de l'axe des z, et le champ électrique est orienté en direction de l'axe des y.

a. Quel est le champ électrique de Hall à l'intérieur du cuivre ? b. Quel est le champ magnétique ? SOLUTION a. Illustrer la situation SOLUTION b. Illustrer la situation La figure 9.20 montre le champ électrique de Hall, orienté des charges positives vers les charges négatives, donc dans le sens de l'axe des y. La figure 9.21 montre une vue en plongée de la situation. La force électrique exercée sur un électron de conduction est vers la gauche (à l'opposé du champ électrique pour les électrons), ce qui implique qu'à l'équilibre, la force magnétique est vers la droite. Selon la règle de la main droite, le champ magnétique doit être entrant dans la page, donc il est orienté dans le sens opposé au sens de l'axe des z. FIGURE 9.20 Le schéma de la situation pour l'exemple 9.5a Décortiquer le problème Selon la figure 9.20, $d = 2{,}50 \times 10^{-3}$ m, car c'est la distance entre les charges positives et les charges négatives. FIGURE 9.21 Une vue en plongée de la situation pour l'exemple 9.5b Décortiquer le problème Identifier la clé La clé est l'équation 9.12, reliant le module du champ électrique et la différence de potentiel de Hall : (i) Résoudre le problème À partir des données de la figure 9.20, nous déterminons l'aire de la section transversale (perpendiculaire au courant) : Nous obtenons Le champ électrique est donc (réponse) 9.5 — La force magnétique sur les fils 311 Identifier les clés La première clé est qu'à l'équilibre, la force de Lorentz sur les électrons de conduction est nulle : (ii) $\times$ La deuxième clé est que le mouvement des électrons produit le courant, selon l'équation 6.5 : Le champ magnétique est donc (réponse) (iii) Valider la réponse Résoudre le problème Nous insérons l'équation (ii) dans l'équation (iii), puis nous isolons le module du champ magnétique : 9.5 L'ordre de grandeur des résultats semble correct. En calculant le module de la vitesse de dérive, nous trouvons $v_d = E/B = 4{,}5$ mm/s, ce qui est semblable aux résultats obtenus dans le chapitre 6. La force magnétique sur les fils Nous avons vu dans la section 9.4 que les électrons de conduction subissent une force magnétique lorsque le conducteur parcouru par un courant électrique est placé dans un champ magnétique.

Cette force doit être communiquée au conducteur en entier. Dans la figure 9.22, une section de fil de longueur est placée dans un champ magnétique Un courant i circule dans le fil. La force magnétique sur une charge est donnée par l'équation 9.2 : $\times$ Un électron de conduction a besoin d'un temps pour se déplacer sur toute la section du fil. On considère le vecteur comme un vecteur dont le module est , et dont l'orientation est celle du courant. On a alors . La charge qui passe vis-à-vis d'un point durant ce temps est q = _ it. La force magnétique sur le fil est Une section de fil, parcourue par un courant, subit une force magnétique.

$\times$ $\times$ $\times$ (9.15) De nouveau, la force est perpendiculaire au champ magnétique et au vecteur , donc perpendiculaire à l'orientation du courant. Le module de la force magnétique est (9.16) où φ est l'angle entre le vecteur FIGURE 9.22 et le champ magnétique .

Force magnétique sur un courant 312 CHAPITRE 09 — La force magnétique Si le fil n'est pas rectiligne ou que le champ magnétique n'est pas uniforme, on doit diviser le fil en éléments de longueur infinitésimale d . Chaque élément de $\times$ longueur subit une force magnétique On obtient la force résultante sur le fil en faisant la somme vectorielle, donc en calculant l'intégrale : (9.17) $\times$ EXEMPLE 9.6 La force magnétique sur un fil Un fil horizontal de 50,0 m est parcouru par un courant de 12,0 A. Le courant est orienté vers le nord. Le fil est placé dans un champ magnétique uniforme ayant une composante de 0,300 T vers le sud et une composante de 0,150 T orientée vers le bas. Calculez la force magnétique exercée sur le fil. SOLUTION Illustrer la situation La figure 9.23 montre une vue en plongée de la situation. Le champ magnétique est décomposé selon ses composantes horizontale (vers le sud) et verticale (vers le bas).

Nous avons tracé un système de coordonnées cartésiennes, avec l'axe des x orienté vers l'est, l'axe des y orienté vers le nord et l'axe des z orienté vers le haut. L'orientation de est obtenue à l'aide de la règle de la main droite du produit vectoriel $\times$. Identifier la clé La clé est l'équation 9.15 : $\times$ Résoudre le problème Nous devons calculer le produit vectoriel à partir des composantes cartésiennes : $\times$ $\times$ Comme $\times$ $\times$ $\times$ nous obtenons FIGURE 9.23 Une vue en plongée de la situation de l'exemple 9.6 La force magnétique est orientée dans le sens opposé de l'axe des x, donc vers l'ouest : (réponse) Décortiquer le problème Le vecteur est orienté vers le nord (dans le sens de l'axe des y), car le courant est orienté vers le nord. Valider la réponse La force magnétique est bien orientée selon le résultat de la règle de la main droite, comme il est indiqué à la figure 9.23. La force magnétique entre deux courants parallèles Nous avons vu à la section 8.2 qu'un long fil parcouru par un conducteur produit un champ magnétique. Si on place un deuxième fil près du premier, le deuxième va subir une force magnétique, car il se trouve dans une région où un champ magnétique existe. Le premier fil va aussi subir une force magnétique, exercée par le deuxième fil. 9.5 — La force magnétique sur les fils Prenons la situation de la figure 9.24a, qui montre une vue de face de deux longs fils parallèles, d'une longueur et séparés par une distance r. Le fil 1 produit un champ magnétique , donné par l'équation 8.14 de la page 265 (si on considère en approximation un fil infini) : (9.18) $\times$ (a) (b) FIGURE 9.24 La force magnétique exercée par deux fils. (a) La force est attractive lorsque les courants sont dans le même sens. (b) La force est répulsive lorsque les courants sont de sens opposés.

Selon la règle de la main droite, le champ est orienté dans la page pour les points sous le fil 1, c'est-à-dire avec une composante x négative, selon le système de coordonnées cartésiennes illustré à la figure 9.24. Tous les points du fil 2 se trouvent à la même distance r du fil 1. Le champ est donc le même pour tous les points du fil 2. De plus, ce champ est perpendiculaire au sens du courant i_2. La force exercée sur le fil 2 est donnée par l'équation 9.15 : $\times$ (9.19) Dans la situation de la figure 9.24a, la règle de la main droite veut que la force sur le fil 2 soit orientée vers le fil 1 (avec une composante z positive). Le fil 2 est attiré par le fil 1. Le module de cette force est (9.20) De même, le fil 1 subit une force magnétique exercée par le champ magnétique produit par le fil 2. Le champ est sortant pour les points au-dessus du fil, et la force est vers le bas, c'est-à-dire vers le fil 2. Les forces et forment une paire action-réaction. Elles ont le même module et des orientations opposées.

La figure 9.24b montre la situation dans le cas de deux longs fils parallèles avec des courants opposés. Cette fois-ci, la force d'interaction est une force répulsive. Deux longs fils parallèles parcourus par des courants continus exercent l'un sur l'autre une force magnétique. Cette force est attractive lorsque les courants sont dans le même sens, et elle est répulsive lorsque les courants sont en sens opposés.

313 314 CHAPITRE 09 — La force magnétique Lorsqu'il y a plusieurs longs fils parallèles dans une configuration, on calcule la force sur un fil particulier en calculant les champs magnétiques produits par les autres fils à la position du fil sur lequel on veut calculer la force, à l'aide de l'équation 9.18. On établit ensuite le champ magnétique résultant en appliquant le principe de superposition (voir l'équation 8.5 de la page 261). Finalement, on calcule la force magnétique exercée par le champ résultant sur le fil à l'aide de l'équation 9.19.

La force entre deux longs fils parallèles est utilisée pour définir l'ampère. Selon la définition du SI, adoptée en 1946, Un courant de 1 A est le courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait une force égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.

EXEMPLE 9.7 La force magnétique résultante La figure suivante montre trois longs fils parallèles ayant chacun une longueur de 2,00 m, où a = 5,00 cm et b = 8,00 cm. Calculez la force résultante sur le fil 3 si $i_1 = 5{,}00$ A, $i_2 = 8{,}40$ A et $i_3 = 3{,}80$ A. SOLUTION Illustrer la situation Nous avons besoin des vecteurs unitaires pour calculer le champ magnétique de chaque fil : La figure 9.25 montre les vecteurs unitaires et les champs magnétiques produits par les fils 1 et 2. Identifier les clés La première clé est l'équation 9.18 : $\times$ FIGURE 9.25 Le schéma de la situation pour l'exemple 9.7 (i) où j = 1 ou j = 2.

La deuxième clé est le principe de superposition pour le champ magnétique : Décortiquer le problème (ii) La troisième clé est l'équation 9.18 qui permet de calculer la force exercée par le champ magnétique résultant sur le fil : $\times$ (iii) 9.6 — Les dipôles magnétiques dans un champ magnétique 315 Nous insérons ce résultat dans l'équation (iii) : Résoudre le problème Nous calculons les champs magnétiques : $\times$ (réponse) Valider la réponse $\times$ Les champs magnétiques calculés ont les orientations données à la figure 9.25, obtenues avec la règle de la main droite. La figure 9.26 montre les vecteurs et $\times$ est aussi comobtenus.

L'orientation de patible avec la règle de la main droite. La composante y de la force a seulement deux chiffres significatifs, car un chiffre significatif a été perdu dans le calcul de la composante z du champ magnétique résultant. $\times$ Ensuite, le champ résultant est obtenu à l'aide de l'équation (ii) : FIGURE 9.26 La validation de l'orientation de 9.6 Les dipôles magnétiques dans un champ magnétique Un champ magnétique uniforme Nous avons vu à la section 8.4 qu'une boucle de courant se comporte comme un dipôle magnétique, tel un barreau aimanté. On sait par expérience qu'un barreau aimanté subit un moment de force lorsqu'il se trouve dans un champ magnétique, comme l'aiguille d'une boussole qui tourne selon le champ magnétique. La figure 9.27a montre une boucle rectangulaire (de longueur a et de largeur b), parcourue par un courant i, dont l'orientation est indiquée dans la figure. La (a) (b) FIGURE 9.27 (a) Une boucle rectangulaire parcourue par un courant i est placée dans un champ magnétique . (b) Chaque côté subit une force magnétique. (c) Une vue de face de la boucle, pour calculer le moment de force. (c) 316 CHAPITRE 09 — La force magnétique boucle se trouve dans un champ magnétique uniforme , orienté dans le sens de l'axe des z. La boucle est inclinée par rapport au système de coordonnées cartésiennes : la normale de la boucle forme un angle φ par rapport au champ magnétique.

On peut décomposer la boucle en quatre côtés. Les côtés 2 et 4 sont horizontaux, alors que les côtés 1 et 3 sont obliques. Chaque côté subit une force magnétique, perpendiculaire à et au sens du courant dans ce côté, comme le montre la figure 9.27b. La force résultante est nulle, car les forces sur les côtés opposés ont le même module et des orientations opposées. Par contre, les forces et produisent un moment de force qui tend à aligner la normale de la boucle sur le champ magnétique. Les forces et ne produisent pas de moment de force, car leurs lignes d'action passent par le centre de la boucle.

Les côtés 2 et 4 ont chacun une longueur a, et le sens du courant est perpendiculaire à parce que ces côtés sont horizontaux. Le module des forces et est Dans le chapitre 12 du tome 1, nous avons vu que pour une force , dont le point d'application est à une position par rapport à un pivot, le moment de force est τ $\times$ Le vecteur moment de force τ est un vecteur perpendiculaire au plan de rotation de l'objet qui tourne, donc selon l'axe des x ici. Dans le présent cas, le moment de force tend à faire tourner la boucle en sens antihoraire, ce qui implique que la composante x du moment de force est positive. On calcule le moment de force par rapport au centre de la boucle. La distance entre chaque point d'application des forces et le centre de la boucle est b/2.

On obtient donc (9.21) Le moment de force dépend du champ magnétique et des propriétés de la boucle. À la section 8.4, nous avons défini le concept de moment magnétique μ pour caractériser les boucles de courant et les dipôles magnétiques. Pour une boucle, ce vecteur est μ , où est le vecteur aire, dont le module est égal à l'aire de la boucle, la direction est perpendiculaire à la boucle et le sens est obtenu à l'aide de la règle de la main droite (on enroule les doigts selon le courant dans la boucle, et le pouce donne le sens de et de μ). Dans le cas présent, l'aire de la boucle est $A = ab$, et le vecteur μ forme un angle φ par rapport au champ magnétique. L'équation 9.21 est donc Cette équation représente le module d'un produit vectoriel. De façon générale, le moment de force d'une boucle (ou d'un dipôle magnétique) dans un champ magnétique est Moment de force sur un dipôle τ μ$\times$ (9.22) 9.6 — Les dipôles magnétiques dans un champ magnétique 317 Dans cette équation, la forme de la boucle n'a pas d'importance. On a fait le calcul avec une boucle rectangulaire car le calcul est plus simple. Dans le cas d'une bobine ayant N spires, le moment de force se calcule à l'aide de la même relation, avec le moment magnétique de la bobine donné par : (9.23) μ Le comportement d'un dipôle magnétique dans un champ magnétique est semblable au comportement d'un dipôle électrique dans un champ électrique (voir la section 2.8). Le moment de force tend à aligner le moment magnétique μ sur le champ magnétique. Le moment de force est nul pour φ = 0 (équilibre stable) et pour φ = 180° (équilibre instable). Tout comme dans le cas du champ électrique, on peut définir l'énergie potentielle associée à l'orientation d'un dipôle dans un champ magnétique. En utilisant la même méthode que dans la section 4.10, on trouve (9.24) μ Énergie potentielle associée à un dipôle magnétique On peut faire tourner un dipôle magnétique en effectuant un travail extérieur. Selon le principe de conservation de l'énergie, (9.25) où K est l'énergie cinétique de rotation du dipôle. EXEMPLE 9.8 La rotation d'une bobine Une bobine verticale rectangulaire possède 50,0 spires, et ses côtés mesurent 40,0 cm sur 30,0 cm. Elle forme un angle de 25,0° par rapport à l'axe des y, comme le montre la figure ci-contre, et elle peut pivoter autour de l'axe des z. Un champ magnétique est présent, et un courant de 3,00 A circule dans la bobine.

a. Calculez le module du moment de force exercé sur la bobine. b. Dans quel sens tournera la bobine si celle-ci est initialement immobile, pour un observateur qui regarde la bobine dans une vue en plongée ? SOLUTION Illustrer la situation La figure 9.28 illustre une vue en plongée de la bobine et du champ magnétique. La convention de la main droite permet d'obtenir l'orientation du moment magnétique μ, qui est perpendiculaire au plan de la bobine. Décortiquer le problème Selon la figure 9.28, l'angle φ entre μ et est L'aire de la boucle est FIGURE 9.28 Une vue en plongée de la situation pour l'exemple 9.8 Le module du moment magnétique de la bobine est (i) 318 CHAPITRE 09 — La force magnétique SOLUTION a. Identifier la clé SOLUTION b. Identifier la clé La clé est l'équation 9.22 : La boucle va tourner selon l'orientation du moment de force, qui tend à aligner le moment magnétique sur le champ magnétique. τ μ$\times$ Puisque c'est le module du moment de force qui est demandé, nous calculons le module du produit vectoriel : (ii) Résoudre le problème Selon la règle de la main droite pour le produit vectoriel, le moment de force est orienté dans le sens de l'axe des z, ce qui produit une rotation : où φ est l'angle entre μ et . en sens antihoraire. (réponse) Résoudre le problème Nous insérons les valeurs dans l'équation (ii) : (réponse) Valider la réponse L'ordre de grandeur a du sens. Nous pourrions aussi calculer le moment de force en utilisant la méthode des composantes, avec μ Le calcul du moment de force donne une composante z positive, car $\times$ Le moteur électrique Le moment de force sur une boucle est le principe de fonctionnement d'un moteur électrique. La figure 9.29 montre le schéma d'un moteur simple. Une bobine (équivalente à plusieurs boucles superposées) est placée dans un champ magnétique produit par un aimant permanent. Une source de f.é.m. alimente la bobine, et un courant continu i circule dans la bobine. Le champ magnétique produit un moment de force qui fait tourner la bobine. Si la bobine était branchée directement à la source de f.é.m., le moment de force alignerait la boucle sur le champ magnétique. Pour obtenir une rotation continue, on ajoute un commutateur qui inverse le courant dans la bobine à chaque demi-tour qu'elle effectue. Le commutateur est composé de deux anneaux reliés à la source. FIGURE 9.29 Le schéma d'un moteur simple 9.6 — Les dipôles magnétiques dans un champ magnétique Un champ magnétique non uniforme Lorsqu'une boucle de courant est dans un champ uniforme (qui ne varie pas d'un point à l'autre de l'espace), la boucle subit une force magnétique résultante nulle. Dans le cas où le champ magnétique n'est pas uniforme, la boucle subit une force. C'est ce qu'on peut voir à la figure 9.30, où une boucle de courant se trouve près d'un barreau aimanté. Supposons que la boucle est orientée de telle sorte que son moment magnétique est orienté parallèlement à l'axe des z. Selon l'équation 9.24, l'énergie potentielle magnétique du système est (9.26) μ Nous avons vu dans le tome 1 que l'énergie potentielle est associée à une force conservative. À la section 9.5 de ce tome, nous avons appris que les composantes de la force magnétique sont obtenues en calculant l'opposé de la dérivée de l'énergie potentielle. Dans le cas présent, la force magnétique sur la boucle de courant a seulement une composante z : (9.27) Regardons les différentes possibilités. Dans la figure 9.31, le moment magnétique a la même orientation que le champ magnétique.

Selon l'orientation de l'axe des z, $\mu_z > 0$. De plus, B_z diminue lorsqu'on se déplace dans le sens de l'axe des z, ce qui fait que $dB_z / dz < 0$.

La composante z de la force magnétique est donc négative, c'est-à-dire que la boucle est attirée par l'aimant. De façon équivalente, on peut placer le pôle nord et le pôle sud de la boucle de telle sorte que le vecteur moment magnétique soit orienté du pôle sud au pôle nord, comme dans la figure 9.31a. On remarque alors que le pôle sud de la boucle est près du pôle nord de l'aimant, ce qui produit une attraction. (a) (b) FIGURE 9.31 La force magnétique sur un dipôle magnétique lorsque : (a) le moment magnétique a le même sens que le champ magnétique ; (b) le moment magnétique est opposé au champ magnétique. Dans la figure 9.31b, le sens du courant dans la boucle a été inversé, ce qui inverse le sens du moment magnétique, qui est maintenant opposé au champ magnétique. Dans ce cas, $\mu_z < 0$, le champ magnétique de l'aimant n'a pas changé ($dB_z / dz < 0$), ce qui produit une force dont la composante z est $F_z > 0$. La force magnétique est vers le haut, c'est-à-dire qu'elle est répulsive. On peut dire cette fois que le pôle nord de la boucle est près du pôle nord du barreau aimanté (voir la figure 9.31b).

En résumé, pour un dipôle magnétique ayant un moment dipolaire μ parallèle au champ magnétique , on peut énoncer ce qui suit. FIGURE 9.30 Une boucle de courant est dans le champ magnétique produit par un barreau aimanté. 319 320 CHAPITRE 09 — La force magnétique • Lorsque μ a le même sens que , la force est orientée vers la région où le module du champ magnétique augmente. • Lorsque μ est de sens opposé à , la force est orientée vers la région où le module de diminue. • La force est nulle dans le cas d'un champ magnétique uniforme. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 9.4 La figure suivante montre une vue de face d'une boucle de courant rectangulaire placée à côté d'un barreau aimanté. Dans quel sens est la force magnétique exercée sur la boucle de courant ? 9.7 Le magnétisme des atomes Le mouvement orbital des électrons Les champs magnétiques étudiés jusqu'à présent sont des champs macroscopiques, produits par des fils parcourus par des courants ou des aimants permanents. Le magnétisme est aussi important au niveau de l'atome, étant donné que les électrons sont des particules chargées en mouvement. Bien que l'étude approfondie de ce sujet dépasse le niveau de cet ouvrage, il est quand même possible de comprendre certains résultats intéressants. On commence d'abord par modéliser un atome à l'aide d'un électron qui tourne sur une orbite circulaire, de rayon r autour d'un noyau positif (voir la figure 9.32). Ceci est équivalent à une boucle de courant, qui se comporte comme un dipôle magnétique.

Le moment magnétique μ d'une boucle de courant est donné par l'équation 8.17 : μ FIGURE 9.32 Le modèle de la boucle de courant pour l'électron À la figure 9.32, l'électron tourne en sens horaire, ce qui est équivalent à un courant en sens antihoraire, car la charge de l'électron est négative. Le moment magnétique orbital μ dû au mouvement orbital de l'électron est donc orienté vers le haut, c'est-à-dire selon l'axe des z. On peut considérer l'électron en mouvement comme une boucle à une spire. Le courant dans la boucle est obtenu à partir de la période T du mouvement circulaire de l'électron ($T = 2\pi r/v$) : Donc, dans ce modèle, le moment magnétique orbital de l'électron est μ (9.28) 9.7 — Le magnétisme des atomes 321 Nous avons vu à la section 12.6 du tome 1 que le moment cinétique de l'électron est une quantité importante dans l'atome. Pour l'électron qui tourne autour d'un noyau, le moment cinétique est donné par l'équation 12.21 du tome 1 : $\times$ $\times$ (9.29) où est la quantité de mouvement de l'électron et , le vecteur rayon de l'orbite. Pour une orbite circulaire, les vecteurs et sont perpendiculaires. De plus, selon la règle de la main droite pour le produit vectoriel, est orienté à l'opposé de l'axe des z, dans le cas de l'électron illustré à figure 9.32. On obtient (9.30) La figure 9.33 montre les vecteurs μ et pour l'électron tournant sur une orbite circulaire. On remarque que les deux vecteurs sont opposés. Ceci est la conséquence de la charge négative de l'électron. En comparant les équations 9.28 et 9.30, on exprime le moment magnétique orbital de l'électron en fonction de son moment cinétique : FIGURE 9.33 Les vecteurs μ et dans le modèle de la boucle de courant (9.31) μ Le modèle utilisé est un modèle classique qui suppose que l'électron se déplace sur une orbite bien déterminée. La réalité est plus complexe : l'électron se comporte à la fois comme une particule et comme une onde. L'électron n'est pas une petite sphère, mais il forme un nuage électronique qu'on appelle une orbitale.

On doit utiliser la mécanique quantique pour analyser le mouvement des électrons dans l'atome. Ce sujet sera traité dans le tome 3. Pour l'instant, on peut améliorer le modèle de la boucle de courant en considérant un résultat de la mécanique quantique : le moment cinétique de l'électron dans l'atome est quantifié. Comme nous l'avons vu à la section 12.6 du tome 1, le module du moment cinétique de l'électron dans l'atome est donné par : h (9.32) où est le nombre quantique orbital (qui correspond aux orbitales que vous avez utilisées dans les cours de chimie, voir le tableau 9.2), et h = $1{,}055 \times 10^{-34}$ J · s est la constante de Planck réduite. Selon la mécanique quantique, on ne peut pas mesurer complètement le vecteur : on peut mesurer son module et sa composante selon un axe, comme l'axe des z. La composante z du moment cinétique est aussi quantifiée : (9.33) h où ml est un entier ( ), appelé le nombre quantique magnétique. En combinant l'équation 9.31 et l'équation 9.33, on trouve qu'un électron dans un atome se comporte comme un dipôle magnétique, avec un moment magnétique ayant une composante z qui dépend du nombre quantique magnétique : h (9.34) TABLEAU 9.2 Le nombre quantique orbital associé aux orbitales orbitale l s 0 p 1 d 2 f 3 g 4 322 CHAPITRE 09 — La force magnétique La constante $\mu_B = eh/(2m) = 9{,}27 \times 10^{-24}$ A · m2 est appelée le magnéton de Bohr, d'après le physicien danois Niels Bohr (1885-1962) qui a élaboré le premier modèle quantique de l'atome d'hydrogène. Cette constante est aussi présentée dans l'annexe B. L'équation 9.34 montre que la composante z du moment magnétique est quantifiée. Le spin de l'électron L'électron, tout comme les autres particules subatomiques, possède un moment cinétique intrinsèque, qu'on appelle le spin . Ce dernier engendre un moment magnétique intrinsèque μ . Le spin est une propriété quantique, qui ne peut pas être expliquée à partir de la mécanique classique. Par exemple, on ne peut pas dire que l'électron tourne sur lui-même et que le spin correspond au moment cinétique de rotation.

En effet, selon les connaissances actuelles, l'électron est une particule ponctuelle. On doit considérer le spin et le moment magnétique intrinsèque comme une propriété de l'électron, comme sa masse et sa charge. L'électron est une particule de spin s = 1/2, car son vecteur spin a un module : h h De plus, comme le vecteur , le spin a une composante Sz qui est quantifiée : h Pour l'électron, ms peut prendre les valeurs (aussi désigné ↓). (aussi désigné ↑) et Une particule chargée ayant un spin est un dipôle magnétique de façon intrinsèque. Le moment magnétique intrinsèque μ , pour une particule dont la charge est q et la masse est m, est relié au spin par l'expression : (9.35) μ où g est un nombre sans unité qu'on appelle simplement le facteur g de la particule. Une valeur positive de g (comme pour le proton) indique que le moment magnétique intrinsèque a le même sens que le spin, alors qu'une valeur négative de g (comme pour l'électron ou le neutron) indique que le moment magnétique intrinsèque est de sens opposé au spin. Ce facteur a été mesuré et calculé très précisément pour l'électron. Il s'agit de l'une des mesures les plus précises définies jusqu'à maintenant : La composante z du moment magnétique intrinsèque de l'électron est h (9.36) Comme le facteur g de l'électron est très près de −2, le moment magnétique intrinsèque de l'électron est presque égal au magnéton de Bohr. On peut considérer le magnéton de Bohr comme une bonne approximation de la valeur absolue de la composante z du moment magnétique intrinsèque de l'électron. Pour un électron dans un atome, on doit combiner l'effet orbital et l'effet de spin afin d'obtenir le moment magnétique résultant. Pour un atome ayant plusieurs 9.7 — Le magnétisme des atomes électrons, le moment magnétique résultant est la somme vectorielle des moments magnétiques de chaque électron (les protons ont des moments magnétiques beaucoup plus faibles que les électrons à cause de leur plus grande masse). Ces moments magnétiques ont tendance à s'annuler. Le moment magnétique de l'atome est souvent le résultat du moment magnétique d'un seul électron de valence. Nous verrons à la section 9.8 que les propriétés magnétiques des objets, y compris les aimants permanents, sont causées par le moment magnétique des électrons. Un atome dans un champ magnétique Un atome possède un moment magnétique μ, causé par le mouvement orbital et le spin des électrons. Supposons qu'un atome est placé dans un champ magnétique extérieur Selon le résultat obtenu à la section 9.6, le champ magnétique exerce un moment de force qui tend à aligner le moment magnétique dans le même sens que le champ magnétique. L'énergie de l'atome sera modifiée selon l'orientation du moment magnétique par rapport au champ magnétique. Selon l'équation 9.24, l'énergie potentielle est μ Pour une particule négative comme l'électron, l'énergie potentielle est minimale lorsque le moment cinétique est opposé au champ magnétique, ce qui produit un moment magnétique dans le même sens que le champ magnétique. Comme le moment magnétique est quantifié, l'énergie potentielle de l'atome sera quantifiée. En utilisant les équations 9.34 et 9.36, on trouve que l'énergie potentielle magnétique dépend des nombres quantiques magnétiques ou de spin : (9.37) (9.38) L'équation 9.38 indique que dans le cas d'un électron sans mouvement orbital, il y a deux valeurs possibles de l'énergie potentielle, selon les deux états possibles de la composante du spin. Nous reparlerons des propriétés magnétiques des atomes dans le tome 3. Nous verrons entre autres que ces effets magnétiques associés au spin sont à la base de l'imagerie par résonance magnétique.

REMARQUE Le signe négatif dans les équations 9.37 et 9.38 est présent, car la charge de l'électron est négative. Pour une particule positive, comme le proton, le signe négatif est remplacé par un signe positif. EXEMPLE 9.9 Un basculement du spin Un atome est placé dans un champ magnétique Dans le cas d'un électron pour lequel = 0 et le spin est opposé au champ magnétique, quel est le travail nécessaire afin d'inverser le spin de l'électron, de sorte qu'il soit dans le même sens que le champ magnétique ? Exprimez votre réponse en électron-volts. 323 324 CHAPITRE 09 — La force magnétique où U est l'énergie potentielle magnétique associée au spin, donnée par l'équation 9.38 : SOLUTION Illustrer la situation La figure 9.34 montre la situation initiale et la situation finale. Le moment magnétique est opposé au spin, car l'électron a une charge négative. (ii) Résoudre le problème Nous insérons l'équation (ii) dans l'équation (i) : (iii) Nous insérons ensuite les valeurs : FIGURE 9.34 Le schéma de la situation pour l'exemple 9.9 Il reste à convertir les joules en électron-volts. Nous utilisons le facteur de conversion donné à l'équation 4.13 de la page 127, et à l'annexe B : Décortiquer le problème (réponse) Identifier la clé La clé est le principe de conservation de l'énergie ; le travail correspond à la variation de l'énergie potentielle : (i) 9.8 Valider la réponse Le travail est positif, car il faut fournir de l'énergie pour briser l'alignement du moment magnétique sur le champ magnétique.

Cette énergie est emmagasinée sous forme d'énergie potentielle magnétique. Les propriétés magnétiques des matériaux Nous avons vu à la section 9.7 que les électrons dans les atomes produisent un champ magnétique. Les électrons ont un moment magnétique intrinsèque, lié à leur spin, et ils ont un moment magnétique orbital selon leur mouvement dans l'atome. À l'intérieur d'un atome à plusieurs électrons, les moments magnétiques des électrons tendent à s'annuler, de telle sorte que le moment magnétique de l'atome est soit nul, soit produit uniquement par quelques électrons. En effet, les électrons ont tendance à former des paires de spins opposés, ce qui produit un moment magnétique nul.

Dans le cas d'atomes ayant un nombre impair d'électrons, il y a au moins un électron seul et l'atome aura un moment magnétique. Lorsque les atomes se combinent dans un réseau cristallin, l'interaction entre les atomes produit un moment magnétique résultant pour l'objet entier. Lorsqu'on place l'objet dans un champ magnétique extérieur, on observe principalement trois comportements, selon le moment magnétique des atomes et l'interaction entre ces moments magnétiques. 9.8 — Les propriétés magnétiques des matériaux 325 Le paramagnétisme Un matériau paramagnétique est constitué d'atomes dont les moments magnétiques des électrons ne s'annulent pas entre eux. Les atomes ont un moment magnétique permanent. En l'absence de champ magnétique extérieur, l'orientation des moments magnétiques atomiques est aléatoire, ce qui produit un moment magnétique nul pour l'objet entier. Si on place un objet paramagnétique dans un champ extérieur, ce dernier produit un moment de force sur les moments magnétiques atomiques, qui tend à les aligner sur le champ. L'alignement n'est pas parfait, car l'agitation thermique provoque des collisions entre les atomes. L'effet est donc faible. Le moment magnétique résultant de l'objet est faible, et il est orienté dans le même sens que le champ magnétique extérieur. Comme nous l'avons vu à la section 9.6, l'objet va subir une force orientée vers la région où le module du champ est plus intense. Le tungstène, le césium et l'aluminium sont des éléments qui sont paramagnétiques. La figure 9.35 montre de l'oxygène liquide qui est attiré par les pôles d'un aimant puissant, puisque l'oxygène est paramagnétique. FIGURE 9.35 L'oxygène liquide est attiré par le champ magnétique d'un aimant, et forme un pont entre les pôles. Le ferromagnétisme Dans un objet composé d'une substance ferromagnétique, les effets magnétiques sont intenses. Le fer, le nickel, le cobalt, le gadolinium et les alliages composés de ces éléments sont des matériaux ferromagnétiques. Les atomes de ces éléments ont un moment magnétique permanent.

De plus, un effet quantique, appelé l'interaction d'échange, tend à aligner les moments magnétiques des atomes adjacents. Le résultat est un très grand alignement des moments dipolaires magnétiques, malgré l'agitation thermique et en l'absence d'un champ magnétique extérieur. Un clou de fer ne se comporte pas comme un aimant permanent lorsqu'il est isolé. Les moments dipolaires magnétiques alignés forment des domaines magnétiques, des régions où tous les moments dipolaires magnétiques sont alignés (voir la figure 9.36).

En l'absence de champ magnétique extérieur, les domaines sont alignés de façon aléatoire, et le clou n'attire pas d'autres clous. Si on place le clou dans un champ magnétique, par exemple en l'approchant d'un aimant, les domaines alignés dans le même sens vont augmenter de grandeur, et le clou acquiert un moment magnétique, dans le même sens que le champ extérieur. On dit qu'il est devenu aimanté. Il y a alors une attraction entre le clou et l'aimant, car le moment magnétique du clou est dans le même sens que le champ magnétique extérieur. Lorsqu'on enlève le champ magnétique extérieur, le fer perd son aimantation ; on dit qu'il est un matériau magnétique doux. Le fer est utilisé pour des applications tels les transformateurs, qui nécessitent des changements rapides de l'aimantation.

Pour obtenir un aimant permanent, il faut que les domaines soient alignés de telle sorte que l'objet ait un moment magnétique non nul.

Ceci se présente dans des matériaux magnétiques durs. C'est le cas pour certains oxydes de fer, comme le Fe_2O_3. On fabrique aussi des aimants permanents puissants à partir d'un alliage de néodyme-fer-bore. Ces aimants sont utilisés pour plusieurs applications modernes ayant besoin d'aimants compacts et puissants, par exemple dans les disques durs, les écouteurs et les moteurs d'appareils sans fil. FIGURE 9.36 Les domaines magnétiques dans un matériau ferromagnétique. Le moment magnétique est nul. CHAPITRE 09 — La force magnétique 326 TABLEAU 9.3 La température de Curie pour certains matériaux ferromagnétiques TC (°C) Matériau Fer 770 Cobalt 1 115 Nickel 354 Gadolinium 19 Fe_2O_3 575 $Nd_2Fe_{14}B$ 300 Lorsque la température atteint un seuil critique, appelé la température de Curie, le matériau perd ses propriétés ferromagnétiques et devient un matériau paramagnétique. À partir de cette température, l'agitation thermique devient plus intense que l'interaction d'échange. Le tableau 9.3 présente la température de Curie pour quelques matériaux ferromagnétiques. Le diamagnétisme Certains éléments, comme le bismuth, le plomb et le cuivre, ont des atomes qui n'ont pas de moment magnétique permanent. Lorsqu'on place ces matériaux dans un champ magnétique extérieur, ils acquièrent un très faible moment magnétique opposé au champ magnétique extérieur. Nous verrons au chapitre 10 un modèle simple qui permet d'expliquer ce phénomène. Comme le moment magnétique est opposé au champ magnétique, un objet constitué d'un matériau diamagnétique subit une force orientée vers la région où le champ est moins intense, donc il subit une répulsion par les pôles d'un aimant. La figure 9.37a montre un morceau de graphite qui flotte au-dessus de quatre aimants de néodyme.

Le diamagnétisme se retrouve dans tous les matériaux, mais son effet est beaucoup plus faible que les effets paramagnétiques et ferromagnétiques. Pour cette raison, on l'observe seulement dans les matériaux qui ne sont ni paramagnétiques ni ferromagnétiques.

(a) Nous avons vu au chapitre 6 que certains matériaux deviennent supraconducteurs lorsque la température est plus basse qu'une température critique.

Lorsqu'on place un supraconducteur dans un champ magnétique, le supraconducteur se comporte comme un matériau diamagnétique parfait. De la même façon que le champ électrique ne pénètre pas dans un conducteur, le champ magnétique ne pénètre pas dans un supraconducteur. C'est l'effet Messner. La figure 9.37b montre un petit aimant qui flotte au-dessus d'un supraconducteur.

TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 9.5 (b) FIGURE 9.37 Deux exemples de lévitation magnétique : (a) un morceau de graphite diamagnétique flotte au-dessus d'aimants ; (b) un petit aimant flotte au-dessus d'un supraconducteur. La figure suivante montre un aimant et deux objets paramagnétiques ou diamagnétiques avec l'orientation de la force magnétique.

Quel objet est diamagnétique ? RÉSUMÉ QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 327 RÉSUMÉ Dans ce chapitre, nous avons étudié la force magnétique exercée par le champ magnétique sur les particules chargées en mouvement et sur les conducteurs parcourus par un courant. LES LOIS ET LES PRINCIPES • Une particule chargée subit une force magnétique lorsqu'elle se déplace à une vitesse dans un champ magnétique : • Un fil parcouru par un courant i, qui se trouve dans un champ magnétique, subit une force magnétique : $\times$ où $\times$ • Une particule chargée qui se déplace dans une région où il y a un champ électrique et un champ magnétique subit une force de Lorentz : est dans le même sens que le courant. • Un dipôle magnétique subit un moment de force lorsqu'il est dans un champ uniforme : τ μ$\times$ Le moment de force tend à aligner μ sur le champ . $\times$ • L'énergie potentielle associée à un dipôle est μ LES RÉSULTATS Le mouvement d'une particule chargée • Lorsque et sont perpendiculaires, la charge décrit un mouvement circulaire. • Les fils parallèles exercent l'un sur l'autre une force magnétique dont le module est – La force est attractive pour des courants orientés dans le même sens. – La force est répulsive pour des courants orientés en sens opposés. • Lorsque n'est pas perpendiculaire à décrit un mouvement hélicoïdal. , la particule • Lorsque des électrons de conduction se déplacent dans un conducteur qui se trouve dans un champ magnétique, on mesure une différence de potentiel ΔV_H perpendiculairement à et au sens du courant. C'est l'effet Hall. 328 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Q questions qualitatives • E exercices simples • P problèmes • Section 9.1 La force magnétique sur une charge en mouvement Q1 Classez les situations suivantes par ordre croissant du module de la force magnétique exercée sur les particules. Le module de la vitesse et le module du champ magnétique sont les mêmes dans chaque situation. (i) Un électron se déplace sur l'axe des x dans un champ magnétique orienté dans le même sens que l'axe des x. (ii) Un électron se déplace sur l'axe des x dans un champ magnétique orienté dans le sens opposé de l'axe des y. (iii) Un proton se déplace sur l'axe des x dans un champ magnétique orienté dans le même sens que l'axe des y. (iv) Un proton se déplace sur l'axe des y dans un champ magnétique orienté dans le sens opposé de l'axe des y. (v) Une particule alpha (charge +2e) se déplace sur l'axe des x dans un champ magnétique orienté dans le même sens que l'axe des y. Q2 La figure 9.38 montre une vue en plongée pour trois situations où une particule chargée subit une force magnétique causée par un champ magnétique . Indiquez si l'orientation de la force magnétique est correcte. solution disponible E4 Une particule alpha, dont la charge est de 2e, se déplace à une vitesse dans un champ magnétique Quelle est la force magnétique exercée sur cette particule ? E5 La vitesse d'un électron se déplaçant dans un champ magnétique, uniforme est L'électron est soumis à une force magnétique Déterminez le champ magnétique si sa composante x est nulle. E6 Un proton se déplace à une vitesse de $2{,}96 \times 10^6$ m/s, orientée directement vers le bas dans une région où il y a un champ magnétique de 4,50 mT orienté à 20,0° à l'est du sud. a. Quelle est la force magnétique ? b. Quelle est l'accélération subie par le proton ? E7 Un faisceau est formé d'électrons qui ont une énergie de 40,0 keV et qui se déplacent à 30° au sud de l'est.

Le faisceau traverse une région où le champ magnétique est de 0,128 T, orienté à 20,0° à l'est du nord. a. Quel est le module de la vitesse des électrons ? b. Quelle est l'accélération subie par les électrons ? P8 Une particule alpha (de charge 2e) se déplace à une dis - tance de 45,0 cm au-dessus d'un très long fil de cuivre rectiligne. Un courant de 7,50 kA circule vers l'est dans le fil. La particule alpha subit une force de a. Quel est le module de la vitesse de la particule alpha ? b. Dans quel sens se déplace la particule alpha ? a. b. c. FIGURE 9.38 • Question 2 Q3 La figure 9.39 montre une région où il y a un champ P9 Un proton se déplaçant à vitesse passe par le point A, près d'un très long fil parcouru par un courant i continu (voir la figure 9.40). Le courant dans le fil est de 2,00 A, et il circule dans le sens opposé à l'axe des x. magnétique perpendiculaire à la feuille. Deux particules chargées se déplacent dans cette région. Indiquez le signe de la charge de chaque particule. a.

Quel est le champ magnétique généré par le fil au point A ? FIGURE 9.39 • Question 3 FIGURE 9.40 • Problème 9 b. Quelle est la force magnétique subie par le proton au point A ? QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 329 Section 9.2 Le mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique faisceau d'électrons et décrive une trajectoire circulaire de 5,0 cm de rayon, perpendiculaire au champ. Q10 La figure 9.41 montre un électron qui se déplace dans a.

Quel module de vitesse doit-on donner aux électrons ? deux régions différentes où il y a un champ magnétique perpendiculaire à la vitesse de l'électron. a. Donnez le sens de chaque champ magnétique.

b.

Dans quelle région le champ magnétique est-il le plus intense ? b. À la place d'une trajectoire perpendiculaire, supposez que la vitesse est à 30 ° par rapport au champ magnétique. Déterminez le module de la vitesse qui permet d'obtenir une hélice ayant un rayon de 5,0 cm. E15 Le tube à rayons cathodiques d'un vieux téléviseur contient un faisceau d'électrons dont l'énergie cinétique est de 12 keV qui se déplace sur un plan horizontal, du sud vers le nord.

À cet endroit, le champ magnétique terrestre a une composante verticale de $5{,}50 \times 10^{-4}$ T, orientée vers le bas. a. Dans quel sens le faisceau d'électrons est-il dévié ? FIGURE 9.41 • Question 10 Q11 Des ions se déplacent dans un champ magnétique uni - forme et perpendiculaire à leur vitesse, comme le montre la figure 9.42. Les ions ont une charge +e ou −e, et ils ont la même vitesse avant d'entrer dans le champ magnétique. a. Quels sont les ions positifs ? b. Classez les ions par ordre croissant de leur masse. b.

Quel est le module de l'accélération des électrons ?

c. Quel est le rayon de la trajectoire ? P16 Le positron est l'antiparticule associée à l'électron ; il a la même masse que l'électron et une charge électrique opposée. Un positron ayant une énergie cinétique de 2,50 keV est lancé dans un champ magnétique uniforme de 0,150 T et selon une vitesse formant un angle de 75,0° par rapport au champ magnétique. a. Quelle est la période de révolution du positron ? b. Quel est le pas de l'hélice ? c. Quel est le rayon de l'hélice ? P17 Un dispositif servant au traitement des tumeurs can- céreuses est équipé d'un électro-aimant générant un champ magnétique uniforme de 0,030 T pour faire dévier de 90,0° des particules alpha utilisées dans les traitements. La masse d'une particule alpha est de 4,00 u et sa charge, de 2e. Quelle est la durée de la déviation ? La vitesse des particules est perpendiculaire au champ magnétique. FIGURE 9.42 • Question 11 E12 Un électron de 850 eV est en rotation dans un plan P18 Un proton se déplace à une vitesse dans un champ magnétique perpendiculaire à un champ magnétique uniforme. Le rayon de son orbite est de 20,0 cm. Quel est le module du champ magnétique dans lequel l'électron se trouve ? a. Quel est l'angle entre la vitesse du proton et le champ magnétique ? E13 Un proton dont l'énergie cinétique est de 12,5 keV b. Quel est le pas de l'hélice ? est en rotation dans un plan perpendiculaire à un champ magnétique uniforme. Le rayon de son orbite est de 7,20 cm. c. Quel est le rayon de l'hélice ?

a. Quelle est la période du mouvement de ce proton ? b. Quel est le module de la force magnétique qui s'exerce sur ce proton ? c. Quel est le module du champ magnétique ? E14 Un tube à vide est placé dans une région où il y a un champ magnétique uniforme de 1,0 mT. On désire qu'un Section 9.3 Quelques applications liées à la force magnétique Q19 Déterminez l'orientation du champ magnétique pour les situations suivantes dans lesquelles les particules se déplacent en ligne droite à l'intérieur d'un sélecteur de vitesse. a. Le champ électrique est avec une vitesse et un électron se déplace 330 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES b. Le champ électrique est une vitesse et un proton se déplace à c. Le champ électrique est à une vitesse et un électron se déplace Q20 Une particule chargée positivement se déplace à une vitesse dans une région où il y a un champ électrique et un champ magnétique , comme le montre la figure 9.43.

Quelle sera la trajectoire de la particule dans les situations suivantes ? la masse de l'autre isotope. Dans le spectromètre utilisé, les ions traversent d'abord un sélecteur de vitesse où le module du champ électrique est de 1,600 × 105 V/m et le module du champ magnétique est de 0,300 0 T. Les ions sont ensuite déviés dans une zone où est présent un champ magnétique de 0,700 0 T. En utilisant le spectromètre, on observe que l'isotope inconnu a frappé le détecteur d'ions 15,79 mm plus loin que l'isotope connu. Sachant que les isotopes sont ionisés deux fois (q = −2e), calculez la masse de l'isotope inconnu. a. v = E/B b. v > E/B c. v < E/B FIGURE 9.44 • Problème 23 FIGURE 9.43 • Question 20 E21 Un faisceau d'électrons entre dans un sélecteur de vitesse dont les plaques, séparées de 34,0 mm, sont soumises à une différence de potentiel de 120 V. Les plaques sont placées dans un champ magnétique de 6,70 mT. Quel est le module de la vitesse des électrons qui se déplacent en ligne droite ? Section 9.4 L'effet Hall Q25 Un courant i circule dans une plaque de cuivre plon- gée dans un champ magnétique . Pour chacune des situations suivantes, indiquez le point qui est au potentiel le plus élevé (les porteurs de charge sont des électrons). E22 Un cyclotron est utilisé pour accélérer des protons à l'aide d'un champ magnétique de 0,14 T. Les dés du cyclotron ont un rayon de 0,25 m. a. b. c. d. a. Quelle est la fréquence à laquelle on doit faire osciller la différence de potentiel appliquée aux dés ?

b. Quel est le module de la vitesse des protons à la sortie du cyclotron ? P23 Dans un spectromètre de masse, un ion de masse M et de charge +q est accéléré sous une différence de potentiel ΔV. L'ion entre dans un champ magnétique perpendiculaire à sa vitesse. La particule se déplace alors sur un demi-cercle et frappe un détecteur à une distance x de son point d'entrée (voir la figure 9.44). Montrez que la relation entre la masse de la particule et la distance x est donnée par : Q26 Une plaque de cuivre, dans laquelle circule un courant, est placée dans un champ magnétique uniforme, comme le montre la figure 9.45. Entre quels points doit-on brancher un voltmètre pour mesurer une différence de potentiel de Hall ? P24 Dans une expérience de laboratoire, on obtient deux isotopes du soufre dont le premier est le 32S, dont la masse est de 31,97 u. Un spectromètre est utilisé pour trouver FIGURE 9.45 • Question 26 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES E27 Une sonde à effet Hall est utilisée pour mesurer un champ magnétique. La sonde consiste en une bande de cuivre (n = 11 × 1028 m−3) ayant une épaisseur de 2,50 mm. Lorsqu'un courant de 2,50 A circule dans la bande, la différence de potentiel de Hall est de 43,4 nV. Quel est le mo dule du champ magnétique ? 331 b. On place le même capteur dans un champ magnétique différent. La différence de potentiel de Hall obtenue est de 1,50 μV. Quel est le module du champ magnétique ? Section 9.5 La force magnétique sur les fils Q31 Un courant continu circule vers le haut dans un magnétique La tige est faite d'argent (n = 7,4 × 1028 m−3), et un courant de 5,00 A circule dans le même sens que l'axe des z (voir la figure 9.46). fil orienté verticalement.

Un électron, situé à droite du fil, se déplace verticalement vers le bas. Quelle est l'orientation de la force magnétique exercée sur l'électron par le fil ? a. Quelle est la différence de potentiel de Hall ? Q32 La figure 9.48 montre deux très longs fils horizon- E28 Une tige conductrice est plongée dans un champ b. Quelle est la vitesse de dérive des porteurs de charge ? c. Quel est le module du champ électrique de Hall ? taux. Le fil du haut est parcouru par un courant i orienté vers la droite. Quel est le sens du courant dans le fil du bas pour que la force gravitationnelle exercée sur le fil du bas soit équilibrée par la force magnétique ? FIGURE 9.48 • Question 32 FIGURE 9.46 • Exercice 28 P29 Une tige conductrice dont la longueur est L = 73,0 mm, la largeur est et l'épaisseur, h = 3,60 mm, se déplace à vitesse constante dans un champ magnétique uniforme (voir la figure 9.47).

Le champ magnétique est perpendiculaire au déplacement de la tige, et les porteurs de charge sont des électrons. Si une sonde à effet Hall mesure une différence de potentiel Vb − Va = 2,65 × 10−5 V, quelle est la vitesse de la tige ? Q33 La figure 9.49 montre quatre situations où de très longs fils sont parcourus par un même courant i. Les fils sont équidistants. Classez les situations suivantes selon un ordre croissant (de la plus négative à la plus positive) de la composante horizontale de la force magnétique exercée sur le fil de gauche.

(i) (ii) (iii) (iv) FIGURE 9.49 • Question 33 E34 Deux très longs fils rectilignes, parcourus par un FIGURE 9.47 • Problème 29 P30 Pour étalonner un capteur à effet Hall, on le place dans une région où il y a un champ magnétique uniforme . Des électrons se déplacent à une vitesse dont le module est de 5,50 × 106 m/s, sur une trajectoire circulaire, dont le plan est perpendiculaire au champ magnétique. Lorsque le rayon de la trajectoire est de 3,50 mm, la différence de potentiel de Hall mesurée par le capteur est de 0,650 μV. a. Quel est le module du champ magnétique ? courant de 2,50 A chacun, sont parallèles et séparés par une distance de 15,0 cm.

Quel est le module de la force magnétique par unité de longueur exercée sur un fil par l'autre fil ? E35 Deux fils, ayant chacun une longueur de 50,0 cm, sont parcourus par des courants identiques. Ils exercent l'un sur l'autre une force répulsive de 5,625 × 10−4 N et sont séparés par une distance de 10,0 mm. a.

Quel est le courant dans chaque fil ? b. Quelle est la relation entre les sens des courants ? 332 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES E36 La figure 9.50 montre un circuit dont une partie passe à travers un champ magnétique uniforme, sortant de la page, dont le module est de 0,350 T. Quelle est la force magnétique exercée sur le circuit ?

FIGURE 9.52 • Problème 39 P40 Deux longs fils conducteurs parallèles sont placés aux FIGURE 9.50 • Exercice 36 sommets d'un triangle équilatéral, où L = 50,0 cm de côté (voir la figure 9.53). On place un troisième fil à l'autre sommet.

Le courant i1 est de 5,00 A, le courant i2 est de 7,00 A et le courant i3, de 9,00 A.

Quelle est la force magnétique exercée sur le troisième conducteur si sa longueur est de 1,20 m ? E37 Une balance de courant est un appareil formé de deux tiges métalliques parallèles dans lesquelles on fait passer un même courant, en sens opposé. La tige du bas est fixe, tandis que la tige du haut est mobile. Une masse est déposée sur la tige du haut pour garder les tiges en équilibre à une certaine distance l'une de l'autre. Pour une balance en particulier, la longueur des tiges est de 30,0 cm et celles-ci sont séparées par une distance de 6,00 mm. Calculez la masse qu'on doit déposer sur la tige du haut lorsqu'on fait circuler un courant de 10,0 A. E38 Dans la figure 9.51, une tige conductrice est attachée FIGURE 9.53 • Problème 40 P41 Une boucle rectangulaire, dans laquelle circule un cou- rant i1, est placée près d'un très long fil rectiligne, parcouru par un courant i2 (voir la figure 9.54). Calculez la force résultante exercée sur la boucle par le fil.

à un ressort ayant une constante de rappel de 30,0 N/m. La tige a une longueur de 2,50 m, et elle se trouve dans un champ magnétique uniforme et perpendiculaire à la tige. Un courant de 7,90 A circule dans la tige. Quel est le champ magnétique si le ressort est comprimé de 2,00 cm et que la tige est à l'équilibre ? FIGURE 9.54 • Problème 41 P42 Un fil rectiligne ayant une masse de 0,483 g et une longueur de 65,0 cm est placé sur un plan incliné de 12,0° (voir la figure 9.55). Un courant de 4,20 A circule dans le fil, dans le même sens que l'axe des x. Un champ magnétique, perpendiculaire au fil, produit une force magnétique horizontale. Calculez le champ magnétique en supposant que le fil est à l'équilibre. FIGURE 9.51 • Exercice 38 P39 Un conducteur de 80,0 cm de longueur forme un angle de 30,0° par rapport à l'axe des x. Il est parcouru par un courant de 3,50 A (voir la figure 9.52). Dans cette région, un champ magnétique est présent. Quelle est la force magnétique exercée sur le fil ? FIGURE 9.55 • Problème 42 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 333 Section 9.6 Les dipôles magnétiques dans un champ magnétique θ = 30° par rapport à l'axe des x. La bobine est dans un champ magnétique uniforme Q43 La figure 9.56 illustre deux situations où une bobine a. Quel le moment magnétique du cadre ? est placée dans un champ magnétique. Initialement, le plan des bobines est horizontal, et ces dernières sont immo biles. Les champs magnétiques ont une composante verticale et une composante horizontale. Les bobines sont libres de tourner. b. Quel est le moment de force exercé sur le cadre ? c. Dans quel sens va tourner le cadre si celui-ci est libre de pivoter ? a. Pour chaque situation, indiquez dans quel sens va tourner la bobine. b. Dans chaque situation, quelle est la variation de l'énergie potentielle du système lorsque la bobine se met à tourner ? FIGURE 9.58 • Exercices 45 et 46 (i) (ii) FIGURE 9.56 • Question 43 E44 Un cadre carré, de 10,0 cm de côté, est parcouru par un courant de 2,0 A. Le plan du cadre forme un angle θ = 50° par rapport à l'axe des x, comme le montre la figure 9.57. Le cadre est dans un champ magnétique uniforme a. Dessinez l'orientation des forces sur chacun des quatre côtés du cadre. b.

Quelle est la force magnétique agissant sur chacun des côtés du cadre ? c. Dans quel sens les forces peuvent-elles faire tourner le cadre ? d. Quel est le module du moment de force exercé sur le cadre ?

FIGURE 9.57 • Exercice 44 E46 La bobine carrée illustrée à la figure 9.58, dont les côtés ont 20 cm de longueur, comporte 5,0 spires. Elle est parcourue par un courant de 2,0 A, et elle est libre de pivoter. Initialement, elle forme un angle θ = 30° par rapport à l'axe des x, et elle est immobile. La bobine est dans un champ magnétique uniforme Quelle est l'énergie cinétique maximale de la bobine ? P47 Un barreau aimanté, dont le moment magné- tique initial est μ est situé dans un champ magnétique uniforme On applique un moment de force pour faire tourner le barreau aimanté, de telle sorte que son moment magnétique final est μ Quel est le travail du moment de force extérieur si le barreau est immobile au début et à la fin de la rotation ? P48 Une petite bobine de courant a 10,0 spires et elle est circulaire. Elle est placée près d'un très long fil parcouru par un courant i1 = 9,00 A (voir la figure 9.59). La bobine a un rayon de 1,50 mm, et elle est parcourue par un courant i2 = 3,4 A.

Quel est le moment de force exercé sur la bobine ? FIGURE 9.59 • Problème 48 E45 La bobine carrée illustrée à la figure 9.58, dont les P49 On place un dipôle magnétique μ à une distance côtés ont 20 cm de longueur, comporte 5,0 spires. Elle est parcourue par un courant de 2,0 A, et elle forme un angle z directement au-dessus d'un dipôle magnétique μ . Les deux moments magnétiques ont la même orientation. 334 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Calculez la force exercée sur le premier dipôle par le second dipôle. P50 Une bobine de courant de 32,0 spires et de 25,0 cm de rayon est parcourue par un courant de 4,00 A.

La bobine est placée dans un champ magnétique non uniforme, dont le module est E52 Un électron est dans l'état et a. Quelle est la composante z de son moment magnétique orbital ?

b. Quelle est la composante z de son moment magnétique intrinsèque ? E53 Comme l'électron a un spin, il possède les propriétés d'un dipôle magnétique. Quel est le module du champ magnétique produit à une distance de 2,40 × 10−12 m ? Le moment magnétique de la bobine et le champ ma gnétique sont orientés dans le même sens que l'axe des z.

Quelle est la force magnétique exercée sur la bobine de courant si cette dernière se trouve à la position z = 3,00 m ? E54 Le nombre quantique orbital d'un électron dans un Section 9.7 Le magnétisme des atomes b. Quelle est l'énergie magnétique orbitale maximale ? E51 Un électron est dans l'état c.

Pour quelle valeur de m l'énergie magnétique orbitale estelle minimale ? = 3, m = 3. a. Quel est le module du moment cinétique ? b. Quelle est la composante z du moment cinétique ?

c. Quelle est la composante z du moment magnétique orbital ? atome est Un champ magnétique sent. Exprimez l'énergie en électronvolts. est pré a.

Pour quelle valeur de m l'énergie magnétique orbitale estelle maximale ? d. Quelle est l'énergie magnétique orbitale minimale ?

e. Quelle énergie doit absorber l'atome pour que l'électron passe de l'état à l'état ? SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 335 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 9.1 a. Dans le sens de l'axe des y Selon la règle de la main droite, on place les doigts vers le haut (selon), et on les tourne pour qu'ils sortent de la page. Le pouce est vers la droite. Comme q > 0, c'est le sens de b. Dans le sens opposé de l'axe des z Selon la règle de la main droite, on place les doigts vers la gauche, et on les tourne pour qu'ils sortent de la page. Le pouce est vers le haut.

Comme q < 0, la force est opposée, donc vers le bas. c. La force est nulle. L'angle entre et est φ = 180°. Le module de la force est Fm = |q|vB sin(180°) = 0 N. 9.2 a. La particule 1 Le rayon de la trajectoire est La particule avec la plus petite masse a moins d'inertie, donc elle tourne sur un plus petit cercle, sachant que les autres paramètres sont les mêmes pour les deux particules. b. La particule 2 Pour la particule 2, le produit × donne un vecteur vers le centre du cercle, donc est vers le centre du cercle lorsque q2 > 0. 9.3 F1 > F3 > F2 La force électrique est vers le haut pour chaque proton. Le module de la force magnétique est plus faible que le module de la force électrique, car E > vB. On trouve l'orientation de la force magnétique à l'aide de la règle de la main droite : est vers le haut, est vers le bas et est nulle parce que la vitesse est parallèle à . La force résultante est la somme de la force électrique et de la force magnétique. 9.4 Vers la droite Selon la règle de la main droite, μ de la boucle est orienté vers la droite. Le champ magnétique de l'aimant est vers la gauche, donc opposé à μ. La force magnétique sur la boucle est orientée vers la région où le champ est moins intense, donc à l'opposé de l'aimant. 9.5 L'objet 2 Un objet diamagnétique acquiert un moment magnétique induit opposé au champ magnétique de l'aimant, ce qui produit une force répulsive. Chapitre 336 L'induction électromagnétique Buts du chapitre Ce chapitre traite de l'induction électromagnétique. Après l'étude de ce chapitre, vous serez en mesure : • de comprendre le phénomène d'induction électromagnétique ; • de calculer la f.é.m. induite dans une bobine à l'aide de la loi de Faraday et de la loi de Lenz ; • de comprendre la façon dont un champ magnétique variable induit un champ électrique ; • d'expliquer de quelle manière un champ électrique variable induit un champ magnétique. Préalables Ce chapitre permet d'établir le lien entre le champ électrique et le champ magnétique. Revoyez : • les sources de différence de potentiel, expliquées à la section 4.9 ; • le champ magnétique des boucles de courant et des solénoïdes, analysé aux sections 8.4 et 8.6 ; • le théorème d'Ampère, étudié à la section 8.5 ; • la force magnétique sur un fil, examinée à la section 9.5 ; • le condensateur plan, présenté à la section 5.2. 337 L'intérieur de la centrale de Beauharnois UN PEU D'HISTOIRE Le chercheur solitaire qui charmait les foules « À quoi ça sert ? » Cette question revient souvent lorsqu'une nouveauté scientifique est annoncée. En 1816, Michael Faraday, âgé de 25 ans, est chargé de parler devant une société savante londonienne de l'oxygène et des autres éléments récemment identifiés par des chimistes tels qu'Antoine Lavoisier et Humphry Davy. Faraday répond à cette interrogation de la salle en reprenant les propos attribués à Benjamin Franklin au sujet de l'utilité des premiers ballons : « Eh ! à quoi bon l'enfant qui vient de naître ? » Et Faraday d'ajouter que c'est la tâche du chercheur de s'efforcer de rendre utiles les trouvailles de la science. Cette préoccupation domine la carrière de Faraday. Fils de forgeron, il travaille d'abord pour un relieur. Il développe sa curiosité en lisant, et sa dextérité dans l'atelier où il peut appliquer jusqu'à mille coups de maillet sans se reposer. En 1812, un client du relieur lui offre des places pour assister à des conférences de Davy.

Faraday prend des notes abondantes et les relie sous la forme d'un volume qu'il présente au conférencier. Blessé par une explosion de laboratoire qui l'empêche de prendre des notes, Davy l'embauche à titre de secrétaire.

Engagé ensuite comme assistant à l'Institution royale de Londres, Faraday aide Davy à isoler l'iode et liquéfier le chlore. À cette époque au Royaume-Uni, la science est un passetemps pour amateurs. La plupart des savants sont des militaires, des pasteurs protestants ou des médecins. Le poste modeste de Faraday lui permet néanmoins de réaliser ses propres expériences et de se dédier à la science. Il augmente ses revenus en exécutant des analyses chimiques pour des entreprises et le gouvernement anglais, pour lequel il travaille aussi comme conseiller scientifique sur des sujets aussi variés que l'amélioration des phares, la qualité de l'avoine fournie aux bagnards et l'utilisation de paratonnerres sur les navires. En 1820, Ørsted annonce qu'un courant électrique affecte une aiguille aimantée et plusieurs physiciens français examinent ce nouveau phénomène. En rédigeant un compte rendu des événements, Faraday invente en 1821 un dispositif capable d'engendrer la rotation continue d'un conducteur sous l'action d'un aimant et, symétriquement, celle d'un aimant sous l'action d'un conducteur. C'est le principe du moteur électrique, mais le sujet ne passionne pas l'Institution royale. Faraday ne poursuivra son investigation de l'électromagnétisme qu'après la mort de Davy, en 1829. En 1831, Faraday découvre l'induction en montrant qu'un électroaimant crée un courant dans un conducteur approprié.

Il apporte la preuve que ce nouveau courant électrique est de même nature que l'électricité issue du frottement ou d'une pile. Ces recherches préparent l'unification de l'électricité et du magnétisme. Afin de démontrer cette unité de tous les phénomènes électriques, Faraday se penche sur leurs effets chimiques.

En 1833, après avoir consulté des collègues, il propose une réforme du vocabulaire de l'électricité et introduit de nouveaux termes, dont anode, cathode, électrode, électrolyse, anion, cation, ion et diélectrique, qui sont encore employés aujourd'hui. Vulgarisateur habile, il donne des conférences qui attirent jusqu'à 1 000 personnes. Pourtant Faraday préfère travailler seul dans son laboratoire. Des heures ou des jours peuvent s'écouler sans qu'il adresse plus de quelques mots à son assistant. Reconnu comme un des meilleurs expérimentateurs de son temps, c'est un des derniers grands physiciens à procéder de manière souvent empirique, sans se référer à des équations chiffrées. À partir de 1855, James Clerk Maxwell traduit sa théorie à base de champs et de lignes de force en termes mathématiques, à la grande satisfaction du vieux savant. S'il ne vit pas assez longtemps pour assister au triomphe de l'électricité utile, Faraday n'aura jamais cessé de travailler pour améliorer la connaissance des phénomènes électriques, la clé de leur utilité. Michael Faraday, 1791-1867 10.1 — La découverte de Faraday Jusqu'à présent, nous avons étudié séparément l'électricité et le magnétisme. Nous avons vu que les charges électriques produisent un champ électrique et que les charges électriques en mouvement produisent un champ magnétique. Dans ce chapitre, nous allons voir que le champ électrique et le champ magnétique sont liés par le phénomène de l'induction électromagnétique. En effet, un champ magnétique variable induit un champ électrique, et un champ électrique variable induit un champ magnétique. Le principe de l'induction électromagnétique est à la base du fonctionnement de nombreux dispositifs électriques. C'est par l'induction qu'il est possible de convertir de l'énergie cinétique en énergie électrique dans les centrales électriques comme celle de Beauharnois. De même, les détecteurs de métal, les téléphones cellulaires, les guitares électriques et les transformateurs utilisent l'induction électromagnétique. En outre, dans une voiture électrique ou hybride, l'induction électromagnétique permet à l'automobile de freiner en récupérant l'énergie pour charger ses batteries. Le lien entre le champ électrique et le champ magnétique est fondamental dans la théorie de l'électromagnétisme. Les équations reliant les champs entre eux et avec la charge et le courant sont appelées les équations de Maxwell. Ces équations impliquent que la lumière est un phénomène électromagnétique, un sujet qui sera étudié dans le tome 3. 10.1 La découverte de Faraday La découverte d'Ørsted a montré que le mouvement des charges électriques, qui se déplacent sous l'influence d'un champ électrique, produit un champ magnétique. Les physiciens du 19e siècle ont ensuite cherché à savoir si le contraire était possible, si un champ magnétique pouvait produire un courant électrique. C'est dans ce but que le physicien anglais Michael Faraday (qui a introduit la notion de champ, présentée dans le chapitre 2) a réalisé l'expérience illustrée à la f igure 10.1. Il a enroulé un fil sur un anneau de fer pour former une bobine, qu'il a reliée à une pile.

Sur le même anneau, il a enroulé une deuxième bobine, branchée à un ampèremètre. Son hypothèse était la suivante : le courant dans la première bobine produirait un champ magnétique qui aimanterait l'anneau de fer, et le champ magnétique du fer pourrait générer un courant électrique dans la deuxième bobine. Le résultat de l'expérience n'est pas celui auquel Faraday s'attendait. Lorsqu'un courant circule dans le circuit de gauche (la bobine primaire), cela ne produit (a) (b) FIGURE 10.1 (a) Lorsqu'on ferme l'interrupteur, un courant est induit dans la bobine secondaire. (b) Il n'y a pas de courant induit lorsqu'un courant continu circule dans le circuit primaire. (c) Lorsqu'on ouvre l'interrupteur, un courant induit apparaît dans la bobine secondaire. (c) 339 340 CHAPITRE 10 — L'induction électromagnétique pas de courant dans le circuit de droite (la bobine secondaire), comme le montre la figure 10.1b. Par contre, Faraday a observé la présence d'un courant pendant un bref moment, à l'instant où il a fermé l'interrupteur (voir la figure 10.1a). De même, à l'instant où il a ouvert l'interrupteur, il a observé un bref courant dans le sens opposé (voir la figure 10.1c). Faraday venait de découvrir l'induction électromagnétique. Le physicien américain Joseph Henry (1797-1878) a aussi découvert l'induction électromagnétique de façon indépendante. Pour comprendre le résultat de son expérience, Faraday a fait appel à sa notion de champ. Le courant dans la première bobine produit un champ magnétique dans le morceau de fer, ce qui aimante ce dernier. Le champ magnétique du fer traverse la deuxième bobine. Un courant est induit dans la deuxième bobine seulement lorsqu'il y a un changement dans les lignes de champ magnétique qui traversent la deuxième bobine. Faraday a vérifié son hypothèse en réalisant d'autres expériences dans lesquelles une variation des lignes de champ traversent une bobine. Dans la figure 10.2a, une première bobine est branchée à une pile.

Une seconde bobine est placée près de la première. Lorsqu'on ouvre ou qu'on ferme l'interrupteur du premier circuit, un courant apparaît dans la deuxième bobine. De même, à la figure 10.2b, on observe un courant dans une bobine lorsqu'on approche ou qu'on éloigne un aimant de celle-ci ; il n'y a pas de courant si l'aimant est immobile. On observe aussi un courant dans la bobine si l'aimant est immobile et que c'est la bobine qui se déplace, comme dans la figure 10.2c. (a) (b) (c) FIGURE 10.2 Trois façons d'obtenir un courant induit : (a) on ouvre ou on ferme un circuit près de la bobine ; (b) on approche ou on éloigne un aimant de la bobine ; (c) on éloigne ou on approche la bobine d'un aimant. Dans toutes ces expériences, ce n'est pas le champ magnétique qui produit un courant. Il y a un courant lorsque le nombre de lignes de champ magnétique qui traversent une bobine varie. On appelle courant induit le courant qui apparaît dans la bobine. Ce courant n'est pas produit par une pile, mais par une nouvelle façon de générer le courant, appelée l'induction électromagnétique. Selon Faraday : Lorsque le nombre de lignes de champ magnétique à travers une bobine varie, il y a une f.é.m. induite E, ce qui produit un courant induit dans la bobine. 10.2 Le flux magnétique Au chapitre 3, nous avons utilisé le flux électrique pour quantifier le nombre de lignes de champ électrique qui traversent une surface. Nous devons procéder de la même manière ici en recourant au flux magnétique ΦB pour quantifier le nombre de lignes de champ magnétique qui traversent une surface. 10.2 — Le flux magnétique 341 La figure 10.3 montre une surface, dont l'aire est A, qui se trouve dans un champ magnétique uniforme. On définit le vecteur comme un vecteur perpendiculaire à la surface et dont le module donne l'aire de la surface. Le flux magnétique à travers la surface est (10.1) FIGURE 10.3 Une surface est traversée par un champ magnétique. où θ est l'angle entre les deux vecteurs.

L'équation 10.1 est valable lorsque le champ magnétique est uniforme et que la surface est plane. Dans les cas où ce n'est pas le cas, il faut diviser la surface en éléments de surface infinitésimaux , comme à la figure 10.4. Le flux à travers un élément infinitésimal est . On obtient le flux net en calculant la somme sur tous les flux infinitésimaux, c'est-à-dire en calculant une intégrale : (10.2) Flux magnétique L'équation 10.2 est l'équation générale du flux magnétique à travers une surface. Dans le Système international, le flux est mesuré en T · m2, qu'on appelle aussi le weber (Wb), en l'honneur du physicien allemand Wilhelm Eduard Weber (1804-1891). FIGURE 10.4 TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 10.1 La figure suivante illustre trois boucles identiques près d'un long fil parcouru par un courant i.

Classez les boucles selon un ordre croissant du flux magnétique à travers les boucles. EXEMPLE 10.1 Lorsque le champ magnétique n'est pas uniforme, on divise la surface en éléments infinitésimaux pour calculer le flux magnétique. Le flux par les composantes Une boucle circulaire a un rayon de 20,0 cm, et son plan est parallèle au plan des xy. Elle se trouve dans un champ magnétique uniforme Calculez le flux magnétique à travers la boucle. Décortiquer le problème (i) Identifier la clé Comme le plan de la boucle est parallèle au plan des xy, la normale au plan de la boucle est parallèle à l'axe des z : La clé est l'équation 10.1, car le champ magnétique est uniforme et la surface de la boucle est une surface plane. Ainsi, (ii) 342 CHAPITRE 10 — L'induction électromagnétique Résoudre le problème Valider la réponse Nous utilisons la méthode des composantes pour calculer le produit scalaire : Seule la composante z du champ magnétique est importante dans le calcul du flux. Les composantes x et y ne produisent pas de flux magnétique, car le plan de la boucle est dans le plan des xy. (réponse) EXEMPLE 10.2 Le flux causé par un fil Une boucle rectangulaire est placée près d'un fil, comme il est indiqué dans la figure suivante. Le fil est très long, et il est parcouru par un courant de 12,0 A. Calculez le flux magnétique à travers la boucle si a = 4,00 cm, b = 5,00 cm et L = 20,0 cm. SOLUTION Illustrer la situation La figure 10.5 montre la boucle et le champ magnétique qui est sortant, selon la règle de la main droite pour le champ magnétique produit par un fil.

Ce champ n'est pas uniforme. Pour calculer le flux, on divise l'aire en petites bandes. Une bande est située à une distance r du fil ; elle a une longueur L et une largeur dr. Le champ ne varie pas le long d'une petite bande. Le champ et l'aire de la boucle sont des vecteurs perpendiculaires à la page. Alors, θ = 0,00°.

Identifier les clés La première clé est qu'un long fil (un fil infini) produit un champ magnétique, donné par l'équation 8.14. Le module du champ magnétique est (i) où r est la distance entre la bande et le fil. La deuxième clé est la définition du flux magnétique. Comme le champ n'est pas uniforme, nous calculons d'abord le flux dΦB à travers une bande de largeur infinitésimale dr. Cette bande est très étroite, de telle sorte que le champ ne varie pas : FIGURE 10.5 Le schéma de la situation pour l'exemple 10.2 (ii) Le flux magnétique à travers la boucle complète est obtenu en calculant l'intégrale : Décortiquer le problème (iii) Les bornes d'intégration correspondent à la plus petite distance et à la plus grande distance entre le fil et la boucle. 10.3 — La loi de Faraday 343 Nous remplaçons les valeurs : Résoudre le problème Nous intégrons en commençant par sortir les constantes : (réponse) (iv) où nous avons utilisé l'identité ln x − ln y = ln(x/y). 10.3 Valider la réponse Nous répondons à la question. Il est important d'utiliser l'équation générale du flux magnétique, car le champ magnétique produit par un fil n'est pas uniforme. La loi de Faraday En se basant sur la définition du flux magnétique, on peut maintenant exprimer la f.é.m. induite dans une boucle d'aire A. La f.é.m. induite est proportionnelle au taux de variation du flux magnétique : (10.3) Nous verrons la signification du signe négatif à la section 10.4, qui est reliée au sens de la f.é.m. Lorsqu'on n'est pas intéressé au sens de la f.é.m. induite, on calcule la valeur absolue : (10.4) Lorsqu'une bobine est un enroulement compact de N spires, chaque spire est traversée par le même flux magnétique. Dans chaque spire, il y a une f.é.m. induite. La f.é.m. induite nette pour la bobine est (10.5) Selon la définition du flux magnétique, donnée par l'équation 10.1, on peut faire changer le flux et obtenir une f.é.m. induite de trois façons : • Le module du champ magnétique à travers la boucle varie. C'est le cas lorsqu'un aimant s'approche ou s'éloigne d'une boucle. • L'aire de la boucle qui se trouve dans le champ magnétique change. Cela se produit par exemple lorsqu'une boucle entre graduellement dans une région où il y a un champ magnétique. • L'angle entre l'aire de la boucle et le champ est modifié. Cela se produit lorsque la boucle change d'orientation, par exemple si on la fait tourner. On calcule le courant induit dans une bobine si on connaît sa résistance R. Dans ce cas, (10.6) Loi de Faraday 344 CHAPITRE 10 — L'induction électromagnétique TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 10.2 Une boucle est soumise à un champ magnétique variable, dont la composante perpendiculaire à la boucle est donnée par le graphique suivant. Classez les quatre intervalles de temps selon un ordre croissant du courant induit dans la boucle. EXEMPLE 10.3 Le courant autour d'un solénoïde Une bobine circulaire, ayant un rayon de 20,0 cm et composée de 50,0 spires, est placée autour d'un long solénoïde, qui a 3 500 spires par mètre et un rayon de 12,0 cm (voir la figure suivante). Le solénoïde est parcouru par un courant variable i = 10,00 − 35,0t, où t est exprimé en secondes et i, en ampères. La bobine a une résistance de 0,500 Ω. a. Quelle est la f.é.m. induite dans la bobine ? b. Quel est le courant induit dans la bobine ? SOLUTION Illustrer la situation La figure 10.6 présente une vue en coupe de la bobine. Le champ magnétique est confiné à l'intérieur du solénoïde, dans un cercle de rayon rs.

La bobine a un rayon r b. Selon la règle de la main droite, le champ magnétique est perpendiculaire au plan de la page, et il entre dans la page. Décortiquer le problème Le vecteur θ = 0,00°. est perpendiculaire à la page, donc SOLUTION a. Identifier les clés La première clé est qu'il y a un champ magnétique uniquement à l'intérieur du solénoïde. Le module du champ est donné par l'équation 8.26 : (i) FIGURE 10.6 Une vue en coupe pour illustrer la situation de l'exemple 10.3 La deuxième clé est la loi de Faraday, donnée par l'équation 10.5 dans le cas d'une bobine, (ii) 10.4 — La loi de Lenz où le flux magnétique à travers une spire est donné par l'équation 10.1 dans le cas d'un champ uniforme : (iii) MISE EN GARDE Dans le calcul du flux, l'aire correspond à l'aire où il y a un champ magnétique, ce qui n'est pas nécessairement l'aire de la bobine. Ici, le champ est confiné à la région à l'intérieur du solénoïde.

C'est pour cette raison que l'aire est celle du solénoïde. Si la bobine était complètement dans le solénoïde, A serait l'aire de la bobine. Résoudre le problème Nous insérons l'équation (iii) dans l'équation (ii), puis nous calculons la dérivée : La valeur absolue de la dérivée par rapport au temps du courant est 10.4 345 (réponse) SOLUTION b. Identifier la clé La clé est l'équation 10.6 : (iv) Résoudre le problème Nous obtenons (réponse) Valider la réponse Nous répondons bien aux questions. Le rayon de la bobine n'est pas un paramètre important lorsque la bobine entoure le solénoïde. Il peut vous sembler bizarre qu'il y ait un courant dans la bobine, même si aucun champ magnétique n'est présent vis-à-vis de la bobine. Pour avoir un courant, il faut qu'une force s'exerce sur les électrons de conduction à l'intérieur de la bobine. Ceci sera expliqué à la section 10.7. La loi de Lenz Peu après la découverte de Faraday, le physicien allemand Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865) a trouvé une façon simple d'obtenir le sens de la f.é.m. et du courant induit dans une boucle. La f.é.m. produit un courant induit qui génère un champ magnétique qui s'oppose à la variation du flux magnétique. Loi de Lenz C'est la loi de Lenz. De façon algébrique, la loi de Lenz est incluse dans la loi de Faraday* par le signe négatif entre la f.é.m. et le taux de variation du flux magnétique. Ce signe indique que le sens de la f.é.m. est opposé au sens du taux de variation du flux magnétique. Pour bien comprendre cette loi, examinons quelques situations. Prenons d'abord la situation de la figure 10.7 à la page suivante, où le pôle nord d'un aimant s'approche d'une boucle. Le champ magnétique est orienté vers le haut, et le flux magnétique augmente lorsque l'aimant s'approche, car le nombre de lignes de champ qui traversent la boucle augmente (voir la figure 10.7a à la page suivante). Le courant induit dans la boucle s'oppose à l'augmentation du flux, en produisant un champ magnétique induit * Pour cette raison, la loi de Faraday (voir l'équation 10.3) est parfois appelée la loi de Lenz-Faraday. Défi animé 10.1 La polarité de la f.é.m. induite demeure-t-elle inchangée lorsqu'un aimant traverse à vitesse constante une bobine reliée à un voltmètre ? 346 CHAPITRE 10 — L'induction électromagnétique (c) (b) (a) FIGURE 10.7 (a) On approche un aimant d'une boucle.

Le champ de l'aimant est orienté vers le haut, et le flux magnétique augmente. (b) Le courant induit dans la boucle produit un champ qui s'oppose à la variation, donc il est en sens opposé à . (c) Pour produire vers le bas, le courant doit circuler en sens horaire, selon la règle de la main droite. Défi animé 10.2 Un aimant qui se déplace perpendiculairement à l'axe d'une bobine reliée à un voltmètre génère-t-il une f.é.m. induite ? Si oui, la polarité de la f.é.m. demeure-t-elle inchangée ? vers le bas (voir la figure 10.7b). On utilise alors la règle de la main droite pour les boucles de courant (voir l'énoncé de la page 269) : on place le pouce vers le bas (selon l'orientation de), et le sens du courant induit correspond au sens des doigts (voir la figure 10.7c). La figure 10.8 montre les quatre situations possibles lorsque le flux magnétique traversant une boucle change. La technique 10.1 indique les étapes à suivre pour déterminer le sens du courant induit. TECHNIQUE 10.1 Le sens du courant induit dans une boucle 1. Trouver le sens du champ magnétique qui traverse la boucle. 2. Déterminer si le flux magnétique augmente ou s'il diminue. 3. Trouver le sens du champ magnétique induit • si le flux magnétique augmente, : est en sens opposé à • si le flux magnétique diminue, ; est dans le même sens que . 4. Trouver le sens du courant induit à l'aide de la règle de la main droite : on place le pouce selon courant iind. ↑ et augmente ; 1. ↑ et diminue ; (d) (c) (b) (a) 1. . Les doigts tournent selon le sens du 1. ↓ et augmente ; 1. ↓ et diminue ; 2. ΦB augmente ; 2. ΦB diminue ; 2.

ΦB augmente ; 2.

ΦB diminue ; 3. Bind ↓ ; 3. Bind ↑ ; 3. Bind ↑ ; 3. Bind ↓ ; 4. iind horaire.

4. iind antihoraire. 4. iind antihoraire. 4. iind horaire. FIGURE 10.8 L'utilisation de la loi de Lenz 10.4 — La loi de Lenz EXEMPLE 10.4 347 Un canon électromagnétique On place un anneau conducteur sur un solénoïde, avec un isolant pour les séparer (voir la figure ci-contre). On branche le solénoïde à une source de f.é.m. Lorsqu'on ferme l'interrupteur, l'anneau subit une force magnétique.

Quel est le sens de cette force ? SOLUTION Illustrer la situation La figure 10.9 présente un schéma de la situation, avec les champs magnétiques.

un champ magnétique vers le haut (selon la règle de la main droite), qui augmente rapidement. 2. Le flux à travers l'anneau augmente. 3. Le champ magnétique induit dans l'anneau doit être opposé au champ magnétique produit par le solénoïde, donc il est orienté vers le bas.

4. Selon la règle de la main droite, le courant induit iind dans l'anneau doit être en sens horaire. Identifier la clé FIGURE 10.9 Le schéma de la situation pour l'exemple 10.4 Décortiquer le problème 1. Le champ magnétique est nul au départ. Lors- qu'on ferme l'interrupteur, le courant circule en sens antihoraire dans le solénoïde, et il produit EXEMPLE 10.5 La clé est que les courants opposés se repoussent. Donc, la force sur l'anneau est répulsive : la force sur l'anneau est vers le haut. Valider la réponse Cet exercice est une démonstration populaire. En fer mant le circuit, l'anneau est propulsé vers le haut. Le sens du courant induit Une bobine de 100 spires est placée dans un champ magnétique variable, comme le montre la figure ci-contre. Chaque spire a une aire de 120 cm2, et le plan de la bobine est perpendiculaire au champ magnétique. La résistance de la bobine est de 4,50 Ω. Le module du champ magnétique en fonction du temps est où t est exprimé en secondes et B, en teslas. À t = 1,10 s : a. Quel est le courant induit ? b. Quel est le sens de ce courant induit ? SOLUTION Décortiquer le problème L'aire doit être exprimée en mètres carrés : (réponse) 348 CHAPITRE 10 — L'induction électromagnétique SOLUTION a. Identifier les clés SOLUTION b. Identifier la clé La première clé est la loi de Faraday pour calculer la f.é.m. : La clé est la loi de Lenz. Selon l'équation (iii), le champ magnétique augmente à t = 1,10 s.

Le champ magnétique induit par la bobine doit être en sens opposé au champ . (i) Résoudre le problème Le champ magnétique induit est donc entrant dans la page (voir la figure 10.10). La deuxième clé est l'équation 10.6 pour calculer le courant induit : (ii) Résoudre le problème Nous calculons d'abord la dérivée du champ magnétique à t = 1,10 s : (iii) Nous insérons ensuite l'équation (i) dans l'équation (ii), puis nous remplaçons les valeurs : FIGURE 10.10 La loi de Lenz est utilisée pour obtenir le sens du courant induit. Selon la règle de la main droite, le sens du courant induit est en sens horaire. (réponse) Valider la réponse (réponse) Nous répondons à la question. Le courant est exprimé en ampères. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 10.3 Une boucle est placée près d'un fil (voir la figure suivante). Le courant dans le fil augmente graduellement. Dans quel sens circule le courant induit à l'intérieur de la boucle ? 10.5 La f.é.m. induite dans un conducteur en mouvement Nous étudions maintenant une autre façon de produire une f.é.m. induite, soit lorsqu'un conducteur est en mouvement dans un champ magnétique. La figure 10.11a montre une tige conductrice, de longueur , qui se déplace à une vitesse dans un champ magnétique perpendiculaire à la page.

Les électrons de conduction subissent une force magnétique orientée vers le bas. Des électrons vont se déplacer vers le bas et s'accumuler sur la surface inférieure de la tige, en laissant des ions positifs sur la surface supérieure. 10.5 — La f.é.m. induite dans un conducteur en mouvement L'accumulation de charge produit un champ électrique , orienté vers le bas (voir la figure 10.11b). Les électrons se déplacent jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre la force magnétique (vers le bas) et la force électrique (vers le haut), comme à la figure 10.11c : × On mesure alors une différence de potentiel entre les extrémités de la tige : (a) (b) (c) FIGURE 10.11 Un conducteur se déplace dans un champ magnétique. (a) Les électrons subissent une force magnétique vers le bas. (b) Les charges négatives s'accumulent sur la surface inférieure, ce qui produit un champ électrique . (c) Les électrons de conduction se déplacent jusqu'à ce que la force électrique et la force magnétique s'équilibrent.

Le mouvement de la tige dans un champ magnétique est une source de différence de potentiel. La différence de potentiel entre les extrémités de la tige dépend du module du champ magnétique, du module de la vitesse et de la longueur de la tige. Le champ magnétique produit une séparation de la charge positive et de la charge négative.

Le conducteur en mouvement est une source de f.é.m., semblable à une pile. Supposons maintenant que la tige est placée sur un rail conducteur fixe pour former un circuit fermé (voir la figure 10.12a). La résistance totale de la tige et du rail est R. La f.é.m. induite dans la tige génère un courant i dans le circuit. On peut représenter le circuit par le circuit équivalent de la figure 10.12b, constitué d'une source de f.é.m. et d'une résistance. Selon la loi des mailles de Kirchhoff, (10.7) Le courant circule en sens antihoraire dans le circuit. (a) (b) FIGURE 10.12 (a) La tige en mouvement est placée sur un rail conducteur, et un courant est généré. (b) Le circuit équivalent.

349 350 CHAPITRE 10 — L'induction électromagnétique On peut aussi analyser la situation en appliquant la loi de Faraday. Lorsque la tige se déplace vers la droite, le flux magnétique à travers la maille augmente. Le courant induit doit produire un champ magnétique opposé au champ magnétique , donc un champ sortant de la page (voir la figure 10.13). Ce résultat est possible si le courant circule dans le sens antihoraire, ce qui est bien le cas. FIGURE 10.13 Lorsque la tige se déplace vers la droite, le flux magnétique à travers la boucle change, ce qui produit un courant induit antihoraire. L'aire de la maille est Selon l'équation 10.3, la f.é.m. induite est (10.8) car dx/dt représente le module de la vitesse de la tige. Le signe négatif est présent pour indiquer le sens de la f.é.m., selon la loi de Lenz. Le courant induit est alors ce qui correspond au courant obtenu dans l'équation 10.7. FIGURE 10.14 Il faut une force pour que la tige se déplace à vitesse constante. Le courant induit circule dans la tige en mouvement. Comme il y a un champ magnétique, la tige subit une force magnétique. Selon la règle de la main droite, cette force est orientée vers la gauche, comme il est indiqué à la figure 10.14. S'il n'y a pas d'autre force, la tige va ralentir ; son énergie cinétique se transforme en énergie électrique. Pour que la tige se déplace à vitesse constante, on doit appliquer une force extérieure , orientée vers la droite. Selon l'équation 9.16 de la page 311, le module de la force extérieure est (10.9) La force extérieure accomplit un travail sur le circuit, car elle est dans le même sens que le déplacement de la tige. Le montage de la figure 10.14 est un générateur simple.

Pour vérifier qu'il y a bien un transfert d'énergie entre l'agent extérieur et le circuit, on calcule la puissance fournie par l'agent extérieur.

Selon le résultat obtenu dans le chapitre 8 du tome 1, la puissance fournie par l'agent extérieur est Dans le circuit, la puissance électrique est dissipée en énergie thermique à cause de la résistance du circuit. Selon l'équation 6.30 de la page 212, Il y a bien conservation de l'énergie : l'énergie fournie au circuit par l'agent extérieur est égale à l'énergie dissipée par le circuit. FIGURE 10.15 La tige se déplace vers la gauche. Le courant induit est en sens ho raire, et la force magnétique est vers la droite, opposée à . Si on inverse la vitesse de la tige, comme le montre la figure 10.15, le flux magnétique dans la maille diminue, et le courant induit doit alors être en sens horaire.

La force magnétique sur la tige est maintenant orientée vers la droite.

La force extérieure doit être orientée vers la gauche, pour pousser la tige à vitesse constante. La force magnétique sur la tige est toujours orientée dans le sens opposé de la vitesse. 10.5 — La f.é.m. induite dans un conducteur en mouvement EXEMPLE 10.6 351 La chute d'une bobine Une bobine rectangulaire, dont le plan est vertical, est en partie dans un champ magnétique (voir la figure suivante). La largeur de la bobine est , sa résistance est R et sa masse, m. On laisse tomber la bobine vers le bas. Sa vitesse augmente graduellement, jusqu'à ce qu'elle atteigne une vitesse constante vf. a. Dans quel sens circule le courant induit dans la bobine ? b. Quel est le courant dans la bobine lorsque celle-ci se déplace à vitesse ? c. Quel est le module de la vitesse vf ? SOLUTION a. Décortiquer le problème Décortiquer le problème À un instant donné, l'aire de la boucle traversée par le champ est Lorsque la bobine tombe, le flux magnétique diminue, car l'aire de la boucle traversée par le champ diminue. Identifier les clés Identifier la clé Pour trouver le sens du courant induit, la clé est la loi de Lenz. La première clé est la loi de Faraday, qui permet de trouver la f.é.m. induite lorsque la vitesse de la bobine est : Résoudre le problème 1. Le champ est sortant. 2. Lorsque la boucle tombe, l'aire de la boucle dans le champ diminue. Le flux magnétique à travers la boucle diminue. 3. Le courant induit doit produire un champ magnétique dans le même sens que .

4. Selon la règle de la main droite, le courant est en sens antihoraire. (réponse) (i) où le flux magnétique est La deuxième clé est l'équation 10.6, qui permet de calculer le courant induit : SOLUTION b. Illustrer la situation La figure 10.16 montre la boucle dans le champ magnétique. FIGURE 10.16 Le calcul de l'aire de la boucle dans le champ magnétique (ii) Résoudre le problème Nous calculons d'abord la f.é.m. induite (en valeur absolue) : car la dérivée de x par rapport au temps représente le module de la vitesse de la bobine. Le courant induit est alors (réponse) 352 CHAPITRE 10 — L'induction électromagnétique où Fm est donnée par l'équation 9.16 : SOLUTION c. Illustrer la situation La figure 10.17 montre la force magnétique (vers le haut) et la force gravitationnelle vers le bas. (iv) Résoudre le problème Nous insérons l'équation (iv) ainsi que le résultat de la partie b. dans l'équation (iii) : En isolant v, nous obtenons FIGURE 10.17 Le diagramme des forces de la boucle qui tombe (réponse) Décortiquer le problème La vitesse est constante lorsque la bobine est à l'équilibre. Identifier la clé La clé est la première loi de Newton, pour la composante y : (iii) Valider la réponse Le résultat a du sens. Pour une certaine vitesse, si nous augmentons la résistance de la boucle, le courant sera plus faible, ce qui diminue la force magnétique. De même, si nous diminuons le champ magnétique ou la largeur de la boucle, nous réduisons la force magnétique. Les courants de Foucault Dans l'exemple 10.6, une force magnétique est opposée à la vitesse lorsqu'une boucle est en train de sortir d'une région où est présent un champ magnétique. La même chose se produit si on veut faire entrer une boucle dans un champ magnétique. La force magnétique est toujours opposée au mouvement de la boucle. FIGURE 10.18 Une plaque conductrice se déplace vers l'extérieur d'un champ magnétique. Ce mouvement induit des courants de Foucault, ce qui produit une force opposée à la vitesse. FIGURE 10.19 Les courants de Foucault dans un système de freinage d'un train La même chose se produit lorsqu'on fait entrer ou sortir une plaque conductrice (en cuivre, par exemple) dans un champ magnétique, comme le montre la figure 10.18.

Le déplacement de la plaque dans le champ magnétique induit des boucles de courants à l'intérieur du conducteur. Ces courants sont appelés les courants de Foucault, car le phénomène a été découvert par le physicien français Léon Foucault* en 1851. Ces courants génèrent une force magnétique , opposée à la vitesse de la plaque.

De plus, comme le conducteur a une résistance, il y a dissipation de l'énergie en énergie thermique par l'effet Joule. La plaque va donc se réchauffer.

Les courants de Foucault sont utilisés dans les systèmes de freinage de train à haute vitesse. Comme le montre la figure 10.19, deux solénoïdes sont placés dans le wagon, de chaque côté du rail. Lorsque le train roule, aucun courant ne circule dans les solénoïdes. Durant le freinage, un courant intense circule dans chacun des solénoïdes, ce qui produit un champ intense entre eux, à travers le rail. Les courants de Foucault apparaissent dans le rail, ce qui engendre une force magnétique de freinage importante, surtout si le train se déplace rapidement. Comme la force diminue avec la vitesse, on ajoute habituellement des freins traditionnels pour immobiliser le train. * Comme nous l'avons vu au chapitre 7 du tome 1, Foucault a aussi montré, à l'aide d'un pendule, que la Terre est en rotation.

10.6 — Les générateurs De même, certains outils électriques comme des scies sont munis de freins magnétiques qui utilisent les courants de Foucault. La lame est freinée rapidement après que l'interrupteur a été ouvert, ce qui améliore la sécurité de ces outils. Les courants de Foucault sont nuisibles dans les moteurs et les transformateurs, car il y a conversion d'énergie électrique en énergie thermique, ce qui diminue le rendement de ces appareils. De plus, les conducteurs peuvent surchauffer à cause de l'énergie dissipée en énergie thermique. Pour réduire ces effets, les conducteurs de ces appareils sont laminés, c'est-à-dire qu'ils sont fabriqués sous forme de minces couches conductrices, séparées par un isolant. De cette façon, les courants de Foucault sont confinés à de petites boucles seulement. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 10.4 La figure suivante montre quatre plaques conductrices identiques qui se déplacent à la même vitesse constante, orientée vers la droite, grâce à une force. Le champ magnétique est uniforme dans une région donnée. Classez les forces par ordre croissant de leur module. 10.6 Les générateurs Nous avons vu à la section 10.5 un générateur, un montage qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans ce montage, une f.é.m. est induite lorsque la tige conductrice se déplace, car le flux à travers une boucle change. Cependant, il est plus pratique de modifier le flux magnétique à travers une bobine que de modifier son aire en faisant tourner celle-ci dans un champ magnétique constant. La figure 10.20 montre le schéma d'un générateur simple.

Ce dernier ressemble beaucoup au moteur électrique que nous avons vu à la section 9.6, sauf qu'on remplace la source de f.é.m.

par un circuit qui utilisera l'énergie électrique, et on ajoute une force extérieure qui fait tourner la bobine. Dans une centrale électrique, la force extérieure est fournie par un courant d'eau (centrale hydroélectrique), le vent (éolienne) ou de la vapeur sous pression produite par une chaudière (centrale thermique ou centrale nucléaire). Supposons une bobine dont l'aire est A et qui est composée de N spires. La force extérieure fait tourner la bobine à une vitesse angulaire ω constante, de telle sorte FIGURE 10.20 Le schéma d'un générateur à courant alternatif simple 353 354 CHAPITRE 10 — L'induction électromagnétique que l'orientation de la bobine par rapport au champ magnétique est θ = ωt (voir au besoin le chapitre 11 du tome 1). Le flux magnétique à travers une spire est La f.é.m. induite est donnée par la loi de Faraday : (10.10) La f.é.m. varie de façon sinusoïdale, entre E = Em = N B Aω et E = −Em = −N B Aω, comme le montre le graphique de la figure 10.21. La valeur maximale Em est aussi appelée l'amplitude de la f.é.m., et elle se produit lorsque sin(ω t) = 1. FIGURE 10.21 La f.é.m. produite par un générateur à courant alternatif Défi animé 10.3 Un aimant qui tourne à vitesse régulière près d'une bobine génère-t-il une f.é.m. induite constante ? EXEMPLE 10.7 Le montage est un générateur à courant alternatif. Nous allons étudier en détail les circuits en courant alternatif au chapitre 12. Dans un générateur à courant alternatif, le sens du courant change à chaque demi-cycle. On peut fabriquer un générateur à courant continu en ajoutant un commutateur à anneaux entre la bobine et le circuit extérieur, comme on l'a vu dans le cas d'un moteur électrique à courant continu. La f.é.m. dans le circuit varie en fonction du temps, mais le sens du courant reste le même. Le même montage peut servir à la fois de moteur et de générateur. C'est le cas pour le moteur électrique d'une voiture hybride. Dans une voiture à essence, les freins fonctionnent par frottement. Durant le freinage, l'énergie cinétique de la voiture est dissipée en énergie thermique dans les freins. Cette éner gie ne peut plus être utilisée pour faire avancer le véhicule. Dans une voiture hybride (ou électrique), les freins sont reliés au moteur électrique. Lorsque les freins sont utilisés, le moteur devient un générateur, et l'énergie cinétique de la voiture est transformée en énergie électrique, qui sert à recharger les batteries. Ceci augmente grandement l'efficacité de la voiture lorsque cette dernière est conduite dans une zone urbaine, qui nécessite de nombreux départs et arrêts. Un générateur d'appoint Quand une panne d'électricité survient, un générateur d'appoint est utilisé pour faire fonctionner des appareils électriques. Le générateur produit une f.é.m. sinusoïdale ayant une valeur maximale de 170 V et une fréquence de 60,0 Hz. Il utilise une bobine carrée de 15,0 cm de côté, comportant 40,0 spires, qui tourne dans un champ magnétique uniforme. Quel est le module du champ magnétique ? SOLUTION Décortiquer le problème La valeur est maximale égal à 1. lorsque le sinus est Résoudre le problème Nous isolons B et remplaçons les valeurs : Identifier la clé La clé est l'équation 10.10 qui donne la f.é.m. d'un générateur à courant alternatif : (réponse) Valider la réponse Nous répondons à la question. L'ordre de grandeur semble correct. 10.7 — Le champ électrique induit 10.7 355 Le champ électrique induit À l'exemple 10.3, nous avons vu qu'un courant est induit dans une bobine lorsque celle-ci entoure une région où le champ magnétique varie dans le temps. De même, lorsqu'on approche un aimant d'une bobine, un courant est induit dans la bobine. Dans ces deux cas, les électrons de conduction ont besoin d'une force pour se déplacer. Ce n'est pas une force magnétique, car dans les deux cas, la bobine (et donc les électrons) est immobile (la force magnétique sur une charge est proportionnelle à la vitesse de la charge). C'est plutôt une force électrique qui fait déplacer les électrons de conduction. À la figure 10.22, une boucle conductrice circulaire immobile, de rayon r, est placée autour d'un long solénoïde qui engendre un champ magnétique sortant. Le solénoïde a un rayon rs, ce qui engendre un champ magnétique confiné à un cercle de rayon rs < r. Il n'y a donc aucun champ magnétique à la position de la boucle. Supposons que le courant dans le solénoïde augmente, de telle sorte que le champ magnétique augmente aussi. Selon la loi de Lenz, le flux magnétique à travers la boucle augmente et il y a un courant induit horaire, pour produire un champ magnétique induit opposé au champ du solénoïde. Comme vis-à-vis de la boucle, il faut un champ électrique en sens horaire.

C'est ce champ qui exerce une force électrique sur les électrons de conduction, et ces derniers vont circuler dans le sens opposé au champ (en sens antihoraire) et générer le courant. Le champ électrique produit par un champ magnétique variable exerce une force électrique, mais ce champ a des caractéristiques différentes du champ électrique produit par des charges électriques. Comme le montre la figure 10.22, le champ électrique tourne autour du solénoïde, ce qui signifie que les lignes de champ électrique sont des courbes fermées. Ces lignes de champ électrique sont semblables aux lignes de champ magnétique, alors que les lignes d'un champ électrique produit par des charges électriques débutent aux charges positives et se terminent aux charges négatives. Regardons une charge q qui se déplace dans la boucle et qui effectue une rotation complète. Le champ électrique produit un travail W = qE(2π r) = qE. Le champ électrique induit est donc une source de f.é.m. De façon générale, on calcule la f.é.m. à l'aide d'une intégrale curviligne sur un parcours fermé : (10.11) Le champ induit n'est pas conservatif, contrairement au champ électrique produit par des charges électriques. On ne peut pas associer un potentiel électrique au champ électrique induit, contrairement au champ électrique produit par des charges électriques.

La loi de Faraday peut être réécrite en fonction du champ électrique induit : Comme la boucle est immobile, on peut faire entrer la dérivée à l'intérieur de l'intégrale. Cette dérivée devient alors une dérivée partielle, étant donné que le champ magnétique peut dépendre des coordonnées x, y, z, et du temps t. FIGURE 10.22 Le champ magnétique variable induit un champ électrique qui produit le courant induit dans la boucle. 356 CHAPITRE 10 — L'induction électromagnétique La loi de Faraday relie alors le champ électrique induit et la dérivée du champ magnétique par rapport au temps : (10.12) Loi de Faraday L'équation 10.12 a la même forme que le théorème d'Ampère (l'équation 8.23 de la page 274), avec remplacé par et iinc remplacé par l'opposé du flux de la dérivée du champ magnétique. Il est donc possible d'obtenir le champ électrique induit dans des situations symétriques, pour lesquelles l'intégrale curviligne sera facile à calculer. La loi de Lenz est incluse dans l'équation 10.12 par le signe négatif. Les lignes de champ électrique tournent dans le sens opposé de la variation du flux de la dérivée du champ magnétique. L'orientation du vecteur d et celle du vecteur sont reliées par la règle de la main droite. On enroule les doigts de la main droite selon le sens du parcours d'intégration pour l'intégrale curviligne. Le pouce donne le sens du vecteur , utilisé pour le calcul du flux. On peut donc dire qu'il y a deux façons de produire un champ électrique : • avec des charges électriques, les lignes de champ vont des charges positives vers les charges négatives ; • avec un champ magnétique variable, les lignes de champ forment des courbes fermées. EXEMPLE 10.8 Le champ électrique autour d'un solénoïde Un long solénoïde, de rayon rs, est parcouru par un courant constantes.

Il possède n spires par unité de longueur. , où im et ω sont des a. Calculez le champ électrique à une distance r du centre du solénoïde, à l'extérieur de ce dernier. b.

Calculez le champ électrique à une distance r du centre du solénoïde, à l'intérieur de ce dernier. SOLUTION a. Illustrer la situation Pour obtenir le champ électrique à une distance r > rs, nous avons besoin d'une boucle d'intégration circulaire, de rayon r, centrée sur le solénoïde. La figure 10.23 montre le parcours d'intégration. FIGURE 10.23 Le parcours d'intégration pour le calcul du champ électrique Décortiquer le problème Par symétrie, le champ électrique doit être en direction tangentielle : si nous tournons le solénoïde ou faisons soit une translation, soit une réflexion par rapport à un plan parallèle ou perpendiculaire au solénoïde, cela ne change rien. Pour respecter la symétrie, le module du champ ne doit pas changer le long du parcours d'intégration. Nous choisissons le parcours d'intégration en sens antihoraire, de telle sorte que le vecteur est sortant. Le vecteur est donc dans le même sens que le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde. 10.7 — Le champ électrique induit Identifier les clés La première clé est la loi de Faraday (l'équation 10.12) : (i) La deuxième clé est l'équation 8.26, qui permet d'obtenir le champ magnétique produit par un long solénoïde : Le signe négatif indique que le champ est opposé à (donc en sens horaire) lorsque le cosinus est positif. Le champ est en direction tangentielle. Nous pouvons ajouter le vecteur unitaire pour indiquer cette direction (voir la sous-section sur les vecteurs unitaires polaires dans la section 2.1 du tome 1). Le champ électrique est alors (réponse) (ii) Résoudre le problème Nous calculons d'abord l'intégrale curviligne du champ électrique, en tenant compte du fait que celuici est parallèle à et qu'il ne change pas sur tout le parcours : 357 SOLUTION b. Illustrer la situation Pour obtenir le champ électrique à l'intérieur du solénoïde, nous utilisons un parcours d'intégration circulaire, de rayon r < rs, comme le montre la figure 10.24. (iii) où r est le rayon de la boucle.

Pour calculer le membre de droite de la loi de Faraday, nous devons d'abord calculer la dérivée du champ magnétique : FIGURE 10.24 Le parcours d'intégration pour calculer le champ électrique à l'intérieur du solénoïde (iv) où est le vecteur normal sortant de la page. Pour calculer l'intégrale de surface, nous remarquons que le champ magnétique du solénoïde est confiné dans un cercle de rayon rs. On calcule uniquement l'intégrale sur la surface du solénoïde. De plus, la dérivée du champ magnétique est uniforme à l'intérieur du solénoïde et elle est dans le même sens que le vecteur On obtient alors Décortiquer le problème Par symétrie, le champ électrique doit être tangent au parcours d'intégration circulaire. Identifier les clés Nous utilisons les mêmes clés qu'en a. Résoudre le problème (v) L'intégrale curviligne se calcule de la même façon qu'en a. : En insérant les équations (iii), (iv) et (v) dans l'équation (i), nous obtenons (vi) La dérivée du champ magnétique est donnée par l'équation (iv). L'intégrale de surface doit être calculée 358 CHAPITRE 10 — L'induction électromagnétique pour un cercle de rayon r < rs. La dérivée du champ est uniforme dans ce cercle et le champ est partout dans ce cercle. Nous obtenons : (vii) En insérant les équations (vi) et (vii) dans l'équa tion (i), nous trouvons La figure 10.25 illustre ce résultat. Remarquez que le champ électrique est nul au centre du solénoïde. De plus, le champ diminue en 1/r à l'extérieur de la région où il y a un champ magnétique. Le champ induit diminue moins rapidement que le champ produit par une charge ponctuelle (qui diminue selon 1/r 2). Ce résultat sera important lorsque nous allons étudier les ondes électromagnétiques, dans le tome 3. Le champ étant dans la direction tangentielle, nous obtenons (réponse) Valider la réponse Comme le champ magnétique dans le solénoïde varie de façon sinusoïdale, le champ électrique varie selon une fonction cosinus. Il est intéressant de regarder le module maximal du champ électrique, lorsque le cosinus vaut ±1 : FIGURE 10.25 Le module maximal du champ électrique en fonction de la distance du centre du solénoïde Un modèle pour le diamagnétisme Nous avons vu à la section 9.8 que certains éléments, comme le cuivre, acquièrent un moment dipolaire magnétique opposé à un champ magnétique extérieur. On peut expliquer ce comportement à l'aide d'un modèle simple du mou vement orbital des électrons. La figure 10.26a montre un électron qui tourne sur une orbite circulaire, en sens horaire. Nous avons vu à la section 9.7 que ce mouvement produit un moment dipolaire magnétique, opposé au moment cinétique de l'électron, car la charge électrique d'un électron est négative.

Le moment magnétique est donc vers le haut. Supposons que l'électron est placé dans une région où le champ magnétique augmente graduellement et qu'il est orienté dans le même sens que μ. Selon la loi de Faraday, cela induit un champ électrique en sens horaire. L'électron subit une force électrique, opposée au champ électrique, donc en sens antihoraire, comme le montre la figure 10.26b. Cette force est opposée à la vitesse orbitale de l'électron. Ce dernier va ralentir, ce qui diminue le moment cinétique et donc le moment magnétique μ de l'électron.

Pour un électron qui tourne en sens antihoraire, le moment magnétique est vers le bas. L'effet du champ magnétique vers le haut, qui augmente graduellement, produit une augmentation de la vitesse de l'électron, ce qui fait augmenter le moment magnétique orienté vers le bas. En l'absence d'un champ magnétique extérieur, le moment magnétique orbital résultant des électrons est nul, car l'orientation des orbites est aléatoire. Lorsqu'un 10.8 — Le théorème d'Ampère-Maxwell (a) (b) FIGURE 10.26 (a) Un électron qui tourne en sens horaire a un moment dipolaire vers le haut. (b) Le champ magnétique vers le haut augmente graduellement ; le champ électrique induit exerce une force opposée à la vitesse, ce qui réduit la vitesse et le moment dipolaire magnétique. champ magnétique augmente graduellement, les moments magnétiques dans le même sens que diminuent, alors que les moments magnétiques opposés augmentent.

L'effet résultant est un moment magnétique résultant opposé au champ magnétique extérieur. La mécanique quantique est nécessaire à la compréhension quantitative du diamagnétisme. Le modèle présenté est très simple, et on doit se limiter à une compréhension qualitative. 10.8 Le théorème d'Ampère-Maxwell Selon le chapitre 2 et la section 10.7, le champ électrique peut être produit de deux façons : • par des charges électriques : les lignes de champ vont des charges positives vers les charges négatives ; • par un champ magnétique variable : les lignes de champ forment des courbes fermées. Pour produire un champ magnétique, nous avons vu au chapitre 8 qu'il faut un courant électrique, c'est-à-dire un mouvement de charges électriques. Le champ magnétique peut être calculé à l'aide de la loi de Biot-Savart ou du théorème d'Ampère. Dans le chapitre 8, les courants étaient toujours constants dans le temps. On peut se demander si ces lois restent valides pour des courants qui varient dans le temps. Est-il aussi possible de produire un champ magnétique à partir d'un champ électrique variable ?

Cette dernière question a été posée par le physicien écossais James Clerck Maxwell (1831-1879), une vingtaine d'années après la découverte de l'induction électromagnétique par Faraday. Maxwell voulait formuler mathématiquement et de façon précise les lois de l'électricité et du magnétisme à partir de la notion de champ, introduite par Faraday. Il a émis l'hypothèse que par symétrie entre le champ électrique et le champ magnétique, un champ électrique variable devait produire un champ magnétique et qu'il fallait modifier le théorème d'Ampère lorsque le courant variait dans le temps. Pour comprendre le raisonnement de Maxwell, nous revenons sur le théorème d'Ampère. Nous avons vu à la section 8.5 que la circulation du champ magnétique sur une boucle d'Ampère est proportionnelle au courant qui passe à travers une surface délimitée par le parcours d'intégration : 359 360 CHAPITRE 10 — L'induction électromagnétique Dans la figure 10.27a, un courant i constant parcourt un fil conducteur. La figure montre deux surfaces, S1 et S2, délimitées par le même parcours d'intégration, tracé en pointillé. Lorsque le courant i est continu, les deux surfaces sont traversées par le même courant iinc = i, et le champ magnétique est illustré à la figure 10.27b. (a) (b) FIGURE 10.27 (a) Pour calculer le champ magnétique à l'aide du théorème d'Ampère, on doit calculer le courant iinc qui traverse la surface S1 ou la surface S 2. (b) Le champ magnétique produit par le courant. Prenons maintenant un circuit dans lequel un condensateur est en train de se charger, comme à la figure 10.28. Cette fois-ci, le courant n'est pas constant ; il varie dans le temps, comme nous l'avons vu à la section 7.7. Nous voulons de nouveau calculer le champ magnétique à l'aide du théorème d'Ampère. Pour des points éloignés du condensateur, le champ magnétique devrait être semblable à celui de la figure 10.27b, avec un module qui varie dans le temps.

Le courant qui traverse la surface S1 est iinc = i. Par contre, il n'y pas de courant qui traverse la surface S2, car les charges s'accumulent sur l'armature du condensateur. Selon le théorème d'Ampère, On obtient deux résultats différents, selon la surface utilisée.

Ceci est incohérent, car on calcule la circulation du champ pour une même courbe fermée. Selon Maxwell, on doit ajouter un terme dans le membre droit du théorème d'Ampère. Pour la surface S2, il n'y a pas de courant qui la traverse, mais il y a un champ électrique , et ce champ varie dans le temps lorsque le condensateur est en train de se charger. Par analogie avec la loi de Faraday, il est intéressant de calculer la dérivée du champ électrique par rapport au temps pour des points sur la surface S2. Pour un condensateur plan, le champ électrique est uniforme entre les armatures, et il est donné par l'équation 5.5 de la page 167 : où q est la charge sur l'armature du condensateur. La dérivée du champ électrique par rapport au temps est : 10.8 — Le théorème d'Ampère-Maxwell FIGURE 10.28 FIGURE 10.29 Pour un condensateur en train de se charger, il n'y a pas de courant qui traverse la surface S 2. Les deux surfaces S1 et S 2 pour calculer la circulation du champ magnétique Or, selon le principe de conservation de la charge, cette dernière change sur l'armature du condensateur à cause du courant électrique i = dq/dt. On voit donc que la dérivée du champ électrique a donc la forme d'une densité de courant (voir l'équation 6.7).

Maxwell a donné le nom de densité de courant de déplacement à l'expression , même s'il n'y a rien qui se déplace entre les armatures du condensateur. On obtient le courant de déplacement en calculant l'intégrale de surface du courant de déplacement (l'équivalent de l'équation 6.10) : (10.13) Le courant i est alors appelé un courant de conduction. On obtient donc le théorème d'Ampère-Maxwell en ajoutant le courant de déplacement au courant de conduction (10.14) Cette équation permet d'obtenir la circulation du champ magnétique le long d'une boucle d'Ampère en fonction du courant de conduction et du courant de déplacement qui traversent n'importe quelle surface délimitée par la boucle d'Ampère. Si on revient à la situation du condensateur qui se charge, comme à la figure 10.29, on vérifie que la circulation du champ magnétique est la même pour les deux surfaces S1 et S2 qui délimitent le parcours d'intégration. Pour la surface S1, iinc = i et de telle sorte que Si à la place, on calcule l'intégrale de surface sur la surface S2, iinc = 0, mais la dérivée du champ électrique est de telle sorte que Théorème d'Ampère-Maxwell 361 362 CHAPITRE 10 — L'induction électromagnétique MISE EN GARDE Le courant de déplacement n'est pas un véritable courant, produit par un déplacement de charge, mais plutôt un facteur proportionnel à la dérivée du champ électrique. Le courant de déplacement est équivalent à un courant électrique dans le sens qu'il produit aussi un champ magnétique. On appelle champ magnétique induit un champ magnétique produit par un champ électrique qui varie dans le temps. La forme du champ magnétique induit est très semblable à celle du champ électrique induit, donné par la loi de Faraday. À la figure 10.30, on compare ces champs induits en fonction des champs variables.

Lorsque les champs et augmentent dans une région, cela induit respectivement un champ électrique et un champ magnétique, ce qui forme des lignes de champ fermées. Les sens des champs induits sont opposés à cause de la loi de Lenz : le champ électrique induit est opposé à l'augmentation du flux magnétique à travers une surface (le signe négatif dans la loi de Faraday), alors que le champ magnétique induit est dans le sens de l'augmentation du flux électrique (il y a un signe positif dans le théorème d'Ampère-Maxwell). (a) (b) FIGURE 10.30 (a) Un champ magnétique variable induit un champ électrique. (b) Un champ électrique variable induit un champ magnétique. EXEMPLE 10.9 À l'intérieur d'un condensateur Un condensateur est constitué de deux armatures circulaires et parallèles, qui ont un rayon de 3,00 cm et sont séparées par une distance de 1,20 mm. Calculez le module du champ magnétique à une distance de 1,20 cm de l'axe du condensateur au moment où le condensateur est en train de se charger à un taux de 2,50 C/s.

SOLUTION Illustrer la situation La figure 10.31 présente le schéma de la situation et le parcours d'intégration, un cercle de rayon r, qui correspond à l'endroit où nous voulons calculer le champ magnétique. (a) (b) FIGURE 10.31 (a) Une vue de face du schéma de la situation de l'exemple 10.9. (b) Une vue en coupe de l'intérieur du condensateur, avec le parcours d'intégration. 10.9 — Les équations de Maxwell 363 Décortiquer le problème (ii) Par symétrie, le champ magnétique doit être en direction tangentielle, car si nous effectuons une rotation du condensateur autour de l'axe, cela ne change pas la configuration. Dans la figure 10.31b, le parcours d'intégration est un cercle de rayon r, en sens antihoraire, de telle sorte que le vecteur a la même orientation que le champ électrique. Le champ électrique entre les armatures est uniforme : Aucun courant ne passe à travers la surface du disque délimitée par la courbe d'Ampère. Le champ électrique est uniforme entre les armatures, tout comme sa dérivée par rapport au temps : (iii) L'intégrale de surface est alors (iv) Nous insérons les équations (ii) et (iv) dans l'équation (i) et nous isolons B : où πR 2 est l'aire d'une armature. Identifier la clé La clé est le théorème d'Ampère-Maxwell : (i) (réponse) Résoudre le problème Valider la réponse Nous calculons d'abord la circulation du champ magnétique, sachant que le champ magnétique doit avoir le même module le long du parcours d'intégration : Nous répondons bien à la question. Le champ magnétique induit est très faible. Il devient important dans les situations où le champ électrique varie très rapidement. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 10.5 La figure suivante présente le module du champ électrique entre les armatures d'un condensateur en fonction du temps. Classez les situations selon un ordre croissant du module du champ magnétique entre les armatures. 10.9 Les équations de Maxwell Jusqu'aux années 1850, l'électricité et le magnétisme étaient considérés comme deux domaines différents de la physique, basés sur plusieurs lois et règles. James Clerk Maxwell (1831-1879) (voir la figure 10.32 à la page suivante) 364 CHAPITRE 10 — L'induction électromagnétique a commencé l'étude de l'électricité et du magnétisme en 1855 en publiant un premier article intitulé « On Faraday's lines of force », où il a introduit le concept de courant de déplacement.

En 1873, il a publié le traité A Treatise on Electricity and Magnetism, dans lequel il expose la théorie de l'électromagnétisme, qui unifie l'électricité et le magnétisme.

Au départ, sa théorie comportait vingt équations. Par la suite, le physicien anglais Oliver Heaviside (1850-1925), en utilisant l'analyse vectorielle, a ramené ce nombre à quatre.

Ces quatre équations, que nous avons vues lorsque nous avons étudié l'électricité et le magnétisme, sont aujourd'hui appelées les équations de Maxwell: (théorème de Gauss) FIGURE 10.32 James Clerk Maxwell (1831-1879), physicien écossais (théorème de Gauss en magnétisme) (loi de Faraday) (théorème d'Ampère-Maxwell). Les équations de Maxwell font partie des équations fondamentales de la physique, car elles décrivent complètement le champ électrique et le champ magnétique. On peut les résumer de la façon suivante : • Le théorème de Gauss : les particules chargées produisent un champ électrique. • Le théorème de Gauss en magnétisme : les monopôles magnétiques n'exis tent pas. • La loi de Faraday : un champ magnétique variable produit un champ électrique. • Le théorème d'Ampère-Maxwell : les champs magnétiques sont produits par les courants et par les champs électriques variables. Pour compléter l'électromagnétisme, il ne manque qu'une équation permettant de calculer la force exercée par les champs sur une particule chargée. Cette équation est celle de la force de Lorentz : Force de Lorentz × (10.15) Cette équation indique qu'une charge subit une force électrique (proportionnelle au champ électrique) et une force magnétique (proportionnelle à la vitesse et au champ magnétique). Les cinq équations représentent la théorie classique complète de l'électromagnétisme. Elles décrivent l'électrostatique, les circuits, le magnétisme et l'induction électromagnétique.

Les autres lois déjà abordées, telles que la loi de Coulomb, les lois de Kirchhoff ou la loi de Biot-Savart, découlent de ces équations. Les ondes électromagnétiques À l'aide de sa théorie, Maxwell a découvert que les champs électrique et magnétique pouvaient être générés en l'absence de charge électrique. En effet, un champ électrique variable peut produire un champ magnétique , et ce champ magnétique variable peut produire un champ électrique. La variation de ce champ électrique produit un champ magnétique, et ainsi de suite. Cette 10.9 — Les équations de Maxwell situation correspond à une onde électromagnétique, c'est-à-dire une oscillation de champs qui se propagent. Selon la théorie de Maxwell, cette configuration doit être constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui sont perpendiculaires entre eux. De plus, les champs sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde (voir la figure 10.33). Maxwell a été capable de calculer la vitesse de propagation de ces ondes. Il a trouvé FIGURE 10.33 Une onde électromagnétique Cette vitesse est égale à la vitesse de la lumière. Pour Maxwell, ce ne pouvait pas être une coïncidence. La lumière devait être une onde électromagnétique. Les physiciens du 19e siècle avaient déjà trouvé que la lumière était une onde. Maxwell venait de découvrir ce qui constituait cette onde : un champ électrique et un champ magnétique oscillants. La prédiction de Maxwell a été vérifiée entre 1886 et 1888 par le physicien allemand Heinrich Hertz (1857-1894). Hertz a produit et détecté des ondes radio à partir de circuits électriques, et il a établi que ces ondes se déplacent à la vitesse de la lumière. L'étude des ondes électromagnétiques, incluant la lumière visible, sera vue en détail dans le tome 3. 365 366 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES RÉSUMÉ RÉSUMÉ Dans ce chapitre, nous avons étudié la relation entre le champ électrique et le champ magnétique au moyen de l'induction électromagnétique. LES DÉFINITIONS LES LOIS ET LES PRINCIPES Le flux magnétique à travers une surface est proportionnel au nombre de lignes de champ magnétique qui traversent une surface : • Selon la loi de Faraday, un champ magnétique variable induit un champ électrique : (champ uniforme) (équation générale) (uniforme) • Selon le théorème d'Ampère-Maxwell, un champ magnétique est créé par un courant de conduction ou par un champ électrique variable : (cas général) LES RÉSULTATS • Il y a une f.é.m.

induite dans une bobine lorsque le flux magnétique à travers la boucle change : Le sens de la f.é.m. induite et du courant induit sont obtenus à l'aide de la loi de Lenz : La f.é.m. produit un courant induit générant un champ magnétique qui s'oppose à la variation du flux magnétique. où N est le nombre de spires de la bobine. • Il y a trois façons d'obtenir une f.é.m. induite : Si augmente, Si diminue, – le module du champ magnétique à travers la bobine change ; – l'aire de la bobine dans le champ magnétique change ; – l'orientation de la bobine par rapport au champ magnétique change. • Lorsque la résistance de la bobine est R, le courant induit est 1. ↑ et augmente ; 1. ↑ et diminue ; 2. ΦB augmente ; 2. ΦB diminue ; 3. Bind ↓ ; 3. Bind ↑ ; 4.

iind horaire. 4. iind antihoraire.

LES ÉQUATIONS FONDAMENTALES DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME • Les équations de Maxwell décrivent le champ électrique et le champ magnétique : (théorème de Gauss) (théorème de Gauss) (loi de Faraday) (théorème d'AmpèreMaxwell). • La force de Lorentz décrit la force exercée sur une charge électrique par un champ électrique et par un champ magnétique : × • Ces équations sont les équations fondamentales de la théorie classique de l'électricité, du magnétisme et de l'optique. QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 367 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Q questions qualitatives • E exercices simples • P problèmes • R problèmes récapitulatifs • solution disponible Section 10.2 Le flux magnétique Q1 Indiquez quelles sont les situations suivantes pour les- quelles le flux magnétique est nul ? (i) Une surface plane dans le plan des xy est à l'intérieur d'un champ magnétique orienté dans le même sens que l'axe des x.

(ii) Une surface plane dans le plan des xz est à l'intérieur d'un champ magnétique orienté dans le même sens que l'axe des x. (iii) Une surface plane dans le plan des yz est à l'intérieur d'un champ magnétique orienté dans le même sens que l'axe des x.

(iv) Une surface plane est entourée d'une boucle de courant i. La surface et le fil sont dans le même plan (voir la figure 10.34a). (v) Une surface plane est traversée en son centre par un fil dans lequel circule un courant i (voir la figure 10.34b). FIGURE 10.36 • Question 3 E4 Le plan d'une boucle de courant circulaire, de 37,6 cm de rayon, forme un angle de 35,2° avec un champ magnétique de 46,9 mT. Quel est le flux magnétique à travers la boucle ? E5 Une boucle de courant, dont le vecteur aire est plongée dans un champ magnétique Quel est le flux magnétique à travers la boucle ? P6 Une boucle carrée, dont la longueur d'un côté est L = 50,0 cm, est située à une distance d = 2,50 cm d'un fil infini (voir la figure 10.37). Déterminez le courant qui traverse le fil, sachant que le flux magnétique à travers la boucle est de 5,25 × 10^{-7} Wb. (a) (b) FIGURE 10.34 • Question 1 Q2 Un très long solénoïde est parcouru par un courant continu i.

On place des boucles à l'intérieur du solénoïde, comme le montre la figure 10.35. Les boucles ont la même aire. Classez les boucles par ordre croissant du flux magnétique à travers celles-ci. FIGURE 10.37 • Problème 6 P7 Une boucle carrée est placée dans un champ non uni- forme , comme le montre la figure 10.38. Le champ magnétique est perpendiculaire au plan de la boucle. Trouvez une expression algébrique pour le flux magnétique à travers la boucle. FIGURE 10.35 • Question 2 Q3 Un très long solénoïde est parcouru par un courant i continu. On place autour du solénoïde trois boucles circulaires ayant des rayons différents (ra < rb < rc), comme le montre la figure 10.36. Classez les boucles par ordre croissant du flux magnétique à travers celles-ci. FIGURE 10.38 • Problème 7 368 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Section 10.3 La loi de Faraday E8 Une bobine de 200 spires a un diamètre de 20,0 cm. Elle est placée perpendiculairement à un champ magnétique de 1,00 T. Ce champ décroît à zéro en 4,00 s.

Quelle est la f.é.m. moyenne durant la décroissance du champ magnétique ? E9 Le flux magnétique à travers la surface d'un conduc- La bobine et le solénoïde ont le même axe. La bobine a une résistance de 5,30 Ω. Le solénoïde est parcouru par un courant variable : où i est mesuré en ampères et t, en secondes.

Quel est le courant induit dans la bobine à t = 0,250 s ? teur circulaire est donné par ΦB = (0,005 6t 2 + 0,007 5t + 0,001 2) Wb, où t est exprimé en secondes. Quelle est la f.é.m. induite au temps t = 2,0 s ?

E10 Une bobine conductrice circulaire, ayant un rayon de 20,0 cm et 15,0 spires, est placée dans un champ magnétique. Celui-ci est perpendiculaire au plan de la bobine, et son module varie selon le graphique de la figure 10.39.

a. Quelle est la f.é.m. induite dans la bobine à t = 7,5 ms ? FIGURE 10.41 • Exercice 12 b. Quelle est la f.é.m.

induite dans la bobine à t = 15 ms ? P13 Une boucle conductrice rectangulaire, de largeur b et c. Quelle est la f.é.m. induite dans la bobine à t = 25 ms ? de hauteur h, est située à une distance d d'un fil infini (voir la figure 10.42). Le courant dans le fil ifil varie en fonction du temps. a. Quelle est la forme générale de la f.é.m. induite dans la boucle ? b. Quel est le courant induit dans la boucle si cette dernière possède une résistance R et ? FIGURE 10.39 • Exercice 10 E11 Une bobine, ayant un rayon de 40,0 cm et 30,0 spires, est placée autour d'un très long solénoïde qui a un rayon de 9,50 cm et 300 spires/cm (voir la figure 10.40). La bobine et le solénoïde ont le même axe. La bobine a une résistance de 5,30 Ω. Le solénoïde est parcouru par un courant variable : où le courant est mesuré en ampères et le temps, en secondes. a. Quelle est la f.é.m. dans la bobine à t = 7,00 s ?

b. Quel est le courant initial dans la bobine ? FIGURE 10.40 • Exercice 11 E12 Une bobine, ayant un rayon de 8,00 cm et 40,0 spires, est placée à l'intérieur d'un très long solénoïde qui a un rayon de 19,20 cm et 250 spires/cm (voir la figure 10.41). FIGURE 10.42 • Problèmes 13 et 14 P14 Une boucle conductrice rectangulaire de largeur b = 5,00 cm et de hauteur h = 2,00 cm est située à une distance d = 0,30 mm d'un fil infini (voir la figure 10.42). La boucle a une résistance R = 35,0 Ω, et le courant dans le fil est ifil = 2,67 sin(0,75t), où i est mesuré en ampères et t, en secondes. Quel est le courant induit dans la boucle à t = 5,0 s ? R15 Une boucle circulaire en cuivre de 15,0 cm de rayon est placée autour d'un très long solénoïde. Le solénoïde contient 20,0 spires par centimètre, et son rayon est de 7,00 cm. La boucle est centrée sur le solénoïde, et leurs axes se confondent (voir la figure 10.43). On relie la boucle à un fil de nichrome, dont la résistivité est de 1,20 μΩ · m, la longueur est de 5,236 m et le diamètre, de 1,00 mm. On néglige la résistance de la boucle de cuivre. On alimente le solénoïde avec un courant qui varie à un taux de 360 A/s. a. Quelle est la f.é.m. induite dans la boucle ? b. Quelle est la résistance du fil de nichrome ? c.

Quelle est la puissance dissipée dans le fil de nichrome ? QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 369 P19 Un courant i circule en sens horaire dans un long solénoïde de 3,60 cm de diamètre et de 200 spires/cm. En son centre, on insère une bobine circulaire de 80,0 spires, ayant un diamètre de 1,70 cm et une résistance de 2,80 Ω, de sorte que leurs axes coïncident (voir la figure 10.45).

Le courant dans le solénoïde augmente à un taux cons tant de 350 A/s. FIGURE 10.43 • Problème récapitulatif 15 a. Quel est le courant induit dans la bobine ? b. Quel est le sens du courant induit dans la bobine ? Section 10.4 La loi de Lenz Q16 Dans les situations suivantes, on déplace un barreau aimanté verticalement, audessus d'une boucle conductrice horizontale. Déterminez le sens du courant induit dans la boucle conductrice, selon une vue en plongée. FIGURE 10.45 • Problème 19 a. b. P20 Une bobine en forme de demicercle, ayant un rayon de 15,0 cm, est placée dans un champ magnétique le module est c. d. E17 Une boucle conductrice se trouve dans un champ magnétique variable, dont le module est B = 3,20t 2 + 1,05t + 0,70, où le temps est mesuré en secondes et le champ magnétique, en milliteslas. La boucle a un rayon de 20,0 cm, et son plan est perpendiculaire au champ ma gnétique (voir la figure 10.44). dont où B est mesuré en teslas et t, en secondes. Le plan de la bobine est perpendiculaire au champ magnétique, comme le montre la figure 10.46. La bobine a 200 spires et une résistance de 0,400 Ω. a. Quel est le courant induit dans la bobine à t = 3,00 ms ? b. Dans quel sens est le courant induit dans la bobine ? a. Quelle est la f.é.m. induite au temps t = 3,00 s ? b. Dans quel sens circule le courant induit dans la boucle ?

FIGURE 10.46 • Problème 20 FIGURE 10.44 • Exercices 17 et 18 E18 Une boucle conductrice circulaire subit une contraction thermique, de telle sorte que son rayon diminue à un taux de 0,060 mm/s.

La boucle se trouve dans un champ uniforme, dont le module est de 0,800 T et qui est orienté perpendi culairement au plan de la boucle, comme à la figure 10.44. a. Quelle est la f.é.m. induite lorsque le rayon de la boucle est de 25,0 cm ? b. Dans quel sens est le courant induit dans la boucle lors de la contraction ? R21 Un circuit (E = 0,500 V et R = 2,50 Ω) est placé près d'un très long fil parcouru par un courant i (voir la fi gure 10.47 à la page suivante). Le courant diminue très rapidement selon l'équation i = 80,0 e−t/τ, où i est mesuré en ampères, t en secondes et τ = 34,0 μs. Le circuit a une longueur une largeur h = 10,0 cm et un de ses côtés est placé à une distance d = 1,00 cm du fil. a. Quelle est la f.é.m. induite dans le circuit par le champ magnétique variable du fil au temps t = τ ? b. Quel est le courant dans le circuit à t = τ ? c. Dans quel sens le courant circuletil dans la résistance R ? 370 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES E25 Un fil de 1,85 m de longueur est placé perpendicu- lairement à un champ magnétique de 0,264 T. Le fil se déplace à une vitesse de 5,18 m/s, dans une direction perpendiculaire à sa longueur et au champ magnétique. Quelle est la différence de potentiel entre les extrémités du fil ? E26 Une tige métallique de 15,0 cm de longueur est placée FIGURE 10.47 • Problème récapitulatif 21 Section 10.5 La f.é.m. induite dans un conducteur en mouvement Q22 Une tige mobile se déplace librement sur un rail conducteur. Un champ magnétique uniforme est perpendiculaire au plan de la page, comme le montre la figure 10.48. Dans quel sens la tige se déplace-t-elle pour que le courant induit circule en sens horaire dans le circuit ? perpendiculairement à un champ magnétique de 0,370 T. La tige se déplace à une vitesse de 9,40 m/s, dans une direction perpendiculaire à sa longueur et au champ magnétique. a. Quelle est la f.é.m. produite dans la tige ? b. Si la tige glisse sur un rail, quel est le courant dans la tige si le circuit complet a une résistance de 150 Ω ? E27 Une tige conductrice AC est en contact avec les rails métalliques AE et CD, qui sont placés à 45,0 cm l'un de l'autre, dans un champ magnétique uniforme de 0,830 T entrant dans la page, perpendiculaire au plan du circuit (voir la figure 10.51). Une résistance R = 9,70 Ω est branchée entre les points D et E. La résistance des autres éléments est négligeable. Une force extérieure est exercée pour que la tige se déplace à une vitesse constante a. Quel est le courant induit dans le circuit ? FIGURE 10.48 • Question 22 Q23 Une boucle conductrice tombe verticalement sous l'effet de la force gravitationnelle. Elle entre dans un champ magnétique perpendiculaire à son plan, comme le montre la figure 10.49. b. Dans quel sens circule le courant induit dans le circuit ? c. Calculez la force . d. Calculez la puissance fournie par la force extérieure. e. Quelle est la puissance dissipée dans la résistance ? a. Dans quel sens circule le courant induit dans la boucle ? b. Dans quel sens est la force magnétique résultante exercée sur la boucle ? FIGURE 10.51 • Exercice 27 FIGURE 10.49 • Question 23 Q24 Une boucle conductrice est placée au-dessus d'un très long fil horizontal, dans lequel circule un courant i continu (voir la figure 10.50 qui montre une vue de face). Déterminez le sens du courant induit dans la boucle : a. lorsqu'on déplace la boucle vers la droite ; b. lorsqu'on déplace la boucle vers le haut. E28 Une tige conductrice AC est en contact avec les rails métalliques AE et CD, placés à 2,50 m l'un de l'autre. Une résistance R = 12,0 Ω est branchée entre les points D et E. La résistance des autres éléments est négligeable. À cet endroit, le champ magnétique terrestre a un module de 60,0 μT, et il est orienté perpendiculairement au circuit, en sortant de la page (voir la figure 10.52). On déplace la tige à une vitesse constante a.

Quelle est la f.é.m. induite dans la tige ?

b. Quel est le champ électrique induit ? c. Quel est le courant dans le circuit et dans quel sens circule-t-il ? FIGURE 10.50 • Question 24 d.

Quelle est la force magnétique exercée sur la tige ? QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 371 Un courant i vers la gauche circule dans le fil. La tige a une longueur , et elle a une extrémité placée à une distance d du fil. La résistance du circuit est R. a. Quel est le courant induit dans le circuit et dans quel sens est ce courant induit ?

FIGURE 10.52 • Exercice 28 P29 Une boucle carrée, ayant des côtés de longueur c et une b. Quelle est la puissance dissipée sous forme d'énergie thermique dans le circuit ? c. Quelle force extérieure doit-on appliquer pour que la tige se déplace à vitesse constante ? résistance R, entre dans un champ magnétique uniforme à t = 0, comme le montre la figure 10.53. Le champ magnétique est uniforme, et il est orienté perpendiculairement au plan de la boucle. Celle-ci se déplace à une vitesse constante. a. Trouvez une expression mathématique pour le courant induit dans la boucle en fonction du temps, lorsque moins que la moitié de l'aire de la boucle est entrée dans le champ magnétique. b. Quel est le courant maximal dans la boucle ? FIGURE 10.55 • Problèmes 31 et 32 P32 On place un très long fil près d'un circuit composé d'une tige conductrice qui se déplace vers la gauche à 5,00 m/s sur des rails conducteurs (voir la figure 10.55). Un courant i = 15,0 A circule vers la gauche dans le fil. La tige a une longueur = 12,0 cm, et elle a une extrémité placée à une distance d = 5,00 mm du fil. La résistance du circuit est R = 0,850 Ω. FIGURE 10.53 • Problème 29 P30 Une tige conductrice est déposée sur deux rails métal- liques, placés à 25,0 cm l'un de l'autre. Une résistance R = 14,0 Ω est branchée entre les rails (voir la figure 10.54). La position de la tige est donnée par x = (3,20t + 1,50) m, et le module du champ magnétique est donné par B = (−0,050 0t 2 + 0,150t − 0,100) T, où t est mesuré en secondes. Le mouvement de la tige s'effectue entre t = 0,00 s et t = 1,70 s. a. Quel est le courant initial dans le circuit ? Indiquez aussi le sens du courant.

b. À quels instants le courant change-t-il de sens ? c. À quel instant le courant est-il maximal dans le circuit ? a. Quel est le courant induit dans le circuit et dans quel sens est ce courant induit ?

b. Quelle est la puissance dissipée sous forme d'énergie thermique dans le circuit ? c. Quelle force extérieure doit-on appliquer pour que la tige se déplace à vitesse constante ? P33 Une boucle rectangulaire de 50,0 spires est placée près d'un fil dans lequel circule un courant i = 26,0 A, vers la gauche (voir la figure 10.56). La bobine a une hauteur h = 20,0 cm, une largeur = 40,0 cm et une résistance de 0,750 Ω. La bobine s'éloigne à une vitesse constante, dont le module est de 7,00 m/s. Quel est le courant induit dans la bobine lorsqu'une de ses extrémités se trouve à une distance y = 1,00 cm du fil ? d. Quel est le courant maximal dans le circuit ? Indiquez aussi le sens du courant. FIGURE 10.56 • Problème 33 Section 10.6 Les générateurs FIGURE 10.54 • Problème 30 P31 On place un très long fil près d'un circuit composé d'une tige conductrice qui se déplace vers la gauche à une vitesse sur des rails conducteurs (voir la figure 10.55). E34 Un générateur est formé d'une bobine carrée ayant des côtés de 0,350 m et 120 spires. La bobine a une vitesse angulaire de 120π rad/s, et elle est située dans un champ magnétique ayant un module de 275 μT. Quelle est l'amplitude de la f.é.m. du générateur ? 372 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES E35 Un générateur d'onde sinusoïdale, dont la fréquence est de 25,00 Hz, est formé d'une bobine carrée ayant des côtés de 18,00 cm et 100 spires. Ces derniers tournent dans un champ magnétique uniforme de 2,000 T.

a. Quelle est l'expression de la f.é.m. du générateur en fonction du temps ? b. Quelle est la valeur maximale de la f.é.m. ? c. À quels instants la f.é.m. atteint-elle sa valeur maximale ? E36 Combien de spires devrait contenir une boucle d'aire égale à 0,10 m2 pour produire une f.é.m. ayant une amplitude de 150 V, lorsque la boucle effectue 60 tours par seconde dans un champ magnétique de 0,50 T ? E37 Une antenne de radio AM est constituée d'une boucle circulaire de 8,00 cm de diamètre et possède 50,0 spires. Le champ magnétique d'une onde radio est perpendiculaire au plan de la bobine, et son module est donné par B = 1,3 × 10^{-10} T cos(ω t). La fréquence de l'onde radio est de 730 kHz. Quelle est l'amplitude de la f.é.m. induite dans la bobine par le champ magnétique ? P38 Un fil est plié en un demi-cercle de rayon r. On fait tourner le plan du demi-cercle à une fréquence f dans un champ magnétique constant qui entre dans le plan de la page (voir la figure 10.57).

Le fil est relié à un circuit de forme rectangulaire, dont la base est b et la hauteur, h.

La résistance du circuit complet est R. Le circuit est toujours perpendiculaire au champ magnétique, et c'est seulement le fil en demi-cercle qui tourne.

FIGURE 10.58 • Question 39 E40 Dans un long solénoïde dont le diamètre est de 7,50 cm, le courant diminue à un taux de 1,20 A/s. Le solénoïde comporte 350 spires par mètre. Quel est le module du champ électrique induit à une distance de 2,50 cm de l'axe central ? E41 Un long solénoïde, dont le rayon est de 3,60 cm, pro- duit en son centre un champ magnétique de 24,0 mT. Si une variation du courant dans le solénoïde fait diminuer la valeur du champ magnétique à un taux de 3,50 mT/s, déterminez le module du champ électrique induit à une distance : a. r = 1,35 cm du centre du solénoïde ; b. r = 5,75 cm du centre du solénoïde. Section 10.8 Le théorème d'Ampère-Maxwell Q42 La figure 10.59 montre un condensateur en train de se charger. Le condensateur est formé de deux disques conducteurs. Dans quel sens est le champ magnétique aux points illustrés ? a. Quelle est l'expression du flux magnétique en fonction du temps ?

FIGURE 10.59 • Question 42 b. Quelle est l'expression du courant induit dans le circuit en fonction du temps ? E43 Un condensateur plan à plaques parallèles circulaires est c. Quelle est la f.é.m. induite maximale ? d. Quelle est la puissance maximale générée par ce circuit ?

chargé par un courant continu. Les armatures ont un rayon de 2,50 cm, et elles sont séparées par une distance de 1,80 mm. La charge surfacique sur l'armature augmente de 1,78 × 10^3 C/m2 par seconde. Quel est le module du champ magnétique à une distance de 1,50 cm de l'axe du condensateur ? E44 Le module du champ magnétique induit à l'extrémité des armatures d'un condensateur à plaques circulaires parallèles est de 6,32 × 10^{-7} T. Si les plaques ont un rayon de 3,24 cm, quel est le taux de variation du module du champ électrique entre les armatures ? R45 Un circuit RC est constitué d'un condensateur de FIGURE 10.57 • Problème 38 Section 10.7 Le champ électrique induit Q39 La figure 10.58 illustre une région circulaire où il y a un champ magnétique uniforme, qui augmente en fonction du temps. La figure montre aussi trois parcours d'intégration circulaires, dont les rayons sont croissants. Classez les trois parcours d'intégration selon un ordre croissant du résultat de l'intégrale 1,50 nF et d'une résistance de 4,50 MΩ, branchés en série à une source de f.é.m. de 120 V. Le condensateur est constitué d'armatures circulaires et parallèles, de 5,00 cm de rayon. On branche le circuit à t = 0, lorsque la charge du condensateur est nulle. a. Quel est le module du champ électrique entre les armatures du condensateur à t = 2,50 ms ? b. Quel est le module du champ magnétique entre les armatures, à une distance de 3,00 cm du centre des armatures, à t = 2,50 ms ? SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 373 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 10.1 Φii < Φi < Φiii Le flux magnétique compte le nombre de lignes de champ qui traversent la surface de la boucle. Les lignes de champ magnétique forment des cercles autour du fil. Dans la situation (ii), il y a autant de lignes qui entrent et sortent de la surface. Dans la situation (i), une partie des lignes qui sortent est annulée par les quelques lignes qui entrent dans la surface. Dans la situation (iii), toutes les lignes entrent. 10.2 (i) < (iv) < (ii) = (iii) Le courant induit est proportionnel à la f.é.m. induite, qui dépend de la dérivée par rapport au temps du flux magnétique, donc de la pente du graphique de Bz en fonction du temps. 10.3 En sens horaire Le fil produit un champ magnétique qui sort de la page, selon la règle de la main droite. Le flux magnétique augmente lorsque le courant dans le fil augmente. Le champ magnétique induit est opposé au champ magnétique du fil, donc entre dans la page. Selon la règle de la main droite pour les boucles de courant, le courant induit doit être en sens horaire. 10.4 F1 = F3 < F2 = F4 Il n'y a pas de courant de Foucault dans les plaques 1 et 3, car le flux magnétique ne change pas pour ces plaques. Il y a des courants de Foucault dans les plaques 2 et 4 parce que le flux magnétique change à travers ces plaques. Les courants de Foucault produisent une force magnétique vers la gauche. Ces forces ont le même module, car les plaques sont identiques et se déplacent à la même vitesse dans un champ magnétique uniforme. 10.5 Bii = Biv < Biii < Bi Le champ magnétique est proportionnel à la dérivée du champ électrique par rapport au temps, donc à la pente du graphique. Chapitre 374 L'inductance Buts du chapitre Dans ce chapitre, le concept d'induction électromagnétique est appliqué aux circuits électriques. Après l'étude de ce chapitre, vous serez en mesure : • de comprendre la notion d'inductance mutuelle et d'auto-induction ; • d'analyser les circuits qui contiennent une bobine d'induction en régime transitoire ; • d'explorer les oscillations dans les circuits. Préalables Ce chapitre poursuit l'étude des circuits électriques. Revoyez : • la puissance dans les circuits, analysée à la section 6.6 ; • les lois de Kirchhoff, présentées à la section 7.2 ; • les circuits RC, décrits à la section 7.7 ; • la loi de Faraday, expliquée à la section 10.3. 375 Les bougies d'allumage, utilisées dans les moteurs à essence, produisent une étincelle grâce à l'inductance. 376 CHAPITRE 11 — L'inductance Dans le chapitre précédent, nous avons vu qu'une f.é.m. est induite lorsque le flux magnétique change dans une bobine. Comme Faraday l'a découvert, si le courant change dans une première bobine placée près d'une deuxième bobine, le flux magnétique variable dans la deuxième induit une f.é.m. Donc, la variation d'un courant dans une première bobine a un effet sur le circuit d'une deuxième bobine. Par ce processus, un circuit peut influer sur un autre circuit, sans y être branché directement. Vous avez peut-être déjà observé une étincelle en débranchant un appareil d'un circuit. Ceci montre qu'un champ électrique très intense était présent, qui dépassait la valeur de la rigidité diélectrique de l'air. Mais pourquoi ce champ électrique intense est-il produit ? Ce champ est le résultat de l'induction électromagnétique dans le circuit de l'appareil lorsque le courant diminue rapidement. Ce phénomène est appelé l'auto-induction. Le même phénomène permet aux bougies d'allumage d'un moteur à essence de générer une étincelle, ce qui provoque l'inflammation du mélange air-essence. L'inductance d'un circuit est importante lorsque celui-ci possède des bobines, qui réagissent de façon importante à la variation de flux magnétique. Lorsque le courant change dans un circuit, il y a une f.é.m. induite dans ce même circuit. En analysant un circuit qui contient une résistance et une bobine, nous verrons que le courant doit changer de façon graduelle. Les circuits constitués de bobines et de condensateurs ont un comportement intéressant : la charge et le courant dans le circuit effectuent des oscillations.

Ce type de comportement a des applications intéressantes, entre autres dans le domaine des télécommunications. 11.1 FIGURE 11.1 Un courant i1 circule dans la première bobine. Si ce courant varie, il y a une f.é.m. induite dans la deuxième bobine. L'inductance mutuelle La figure 11.1 montre une première bobine (la bobine 1) de N1 spires, parcourue par un courant i1. À côté de cette bobine, il y a une seconde bobine (la bobine 2) de N2 spires. La bobine 1 produit un champ magnétique . Chaque spire de la bobine 2 est traversée par les lignes de champ magnétique, ce qui engendre un flux magnétique Φ2←1 pour chaque spire. Nous utilisons une notation semblable à celle qui a été employée pour décrire les paires action-réaction : Φ2←1 veut dire « le flux à travers la bobine 2 produit par le champ de la bobine 1 ». Le flux magnétique net à travers la bobine 2, causé par la bobine 1, est Φbobine = N2Φ2←1. Le flux magnétique est directement proportionnel au courant dans la bobine 1. En effet, si on double le courant, le champ magnétique double et, par conséquent, le flux magnétique double aussi. On peut donc écrire (11.1) La constante de proportionnalité M2/1 est appelée l'inductance mutuelle de la bobine 2 par rapport à la bobine 1 : (11.2) L'inductance mutuelle M2/1 représente le flux total à travers la bobine 2 par unité de courant qui circule dans la bobine 1.

Ce paramètre dépend de la 11.1 — L'inductance mutuelle géométrie du système : la forme des bobines et la position relative des bobines. Dans le Système international, l'inductance mutuelle se mesure en henrys (H), en l'honneur du physicien américain Joseph Henry (1797-1878).

En se basant sur l'équation 11.2, on obtient (11.3) Supposons maintenant que le courant i1 varie dans la bobine 1, ce qui fait varier le flux magnétique à travers la bobine 2. Il y a alors une f.é.m. induite dans la bobine 2. Selon la loi de Faraday (voir l'équation 10.5 de la page 343), on a (11.4) La f.é.m. induite dépend directement du taux de variation du courant dans la bobine 1 et de l'inductance mutuelle de la bobine 2 par rapport à la bobine 1. Inversons maintenant les rôles des bobines (voir la figure 11.2) : supposons qu'un courant i2 circule dans la bobine 2, ce qui produit un champ magnétique .

Il y a un flux magnétique net ΦB = N1Φ1←2 à travers la bobine 1, causé par la bobine 2. Ce flux est proportionnel au courant i2 : où M1/2 est l'inductance mutuelle de la bobine 1 par rapport à la bobine 2. Selon la loi de Faraday, si le courant i2 varie dans le temps, il y a une f.é.m. induite dans la bobine 1 : (11.5) Cette fois-ci, la f.é.m. induite dans la bobine 1 dépend de l'inductance mutuelle de la bobine 1 par rapport à la bobine 2 et du taux de variation du courant i2. Un calcul avancé recourant au calcul intégral permet de démontrer que les deux inductances mutuelles sont égales : (11.6) On parle alors simplement de l'inductance mutuelle du système composé des deux bobines. Les indices ne sont donc pas nécessaires. REMARQUE Le signe négatif dans les équations 11.4 et 11.5 indique que la f.é.m. induite s'oppose à la variation du flux magnétique, selon la loi de Lenz, et permet d'obtenir le sens de la f.é.m. induite. Dans la plupart des situations, on n'est pas intéressé au sens de la f.é.m. On calcule alors la valeur absolue de E. FIGURE 11.2 Un courant i2 circule dans la bobine 2. Si ce courant varie, il y a une f.é.m. induite dans la bobine 1. 377 378 CHAPITRE 11 — L'inductance EXEMPLE 11.1 L'inductance mutuelle d'un système fil-bobine Une bobine rectangulaire de N spires est placée près d'un très long fil rectiligne dans lequel un courant i circule vers la gauche (voir la figure suivante). a. Trouvez une expression algébrique pour l'inductance mutuelle du système. b. Le taux de variation du courant dans le fil est de 3,40 A/s. Calculez la valeur de la f.é.m. (en valeur absolue) dans la bobine si a = 2,00 cm, b = 10,0 cm, = 20,0 cm et N = 200. SOLUTION a. Illustrer la situation Résoudre le problème Le courant i1 circule dans le fil, ce qui produit un champ magnétique .

Ce champ n'est pas uniforme. Pour calculer le flux à travers la bobine, nous la divisons en éléments de surface comme le montre la figure 11.3. Nous calculons d'abord le flux en remplaçant l'équation (i) dans l'équation (iii), puis en intégrant : (iv) En remplaçant le résultat de l'équation (iv) dans l'équation (ii), nous obtenons l'inductance mutuelle du système : FIGURE 11.3 La bobine est divisée en éléments dA pour le calcul du flux magnétique. (réponse) Décortiquer le problème Le module du champ magnétique produit par un fil rectiligne est obtenu par l'équation 9.18 : (i) Valider la réponse L'inductance mutuelle dépend seulement des données géométriques du système, comme il se doit. SOLUTION b. Décortiquer le problème Identifier la clé La clé est la définition de l'inductance mutuelle, donnée par l'équation 11.2 : (ii) où le flux magnétique à travers une spire est donné par l'équation 10.2 : (iii) Identifier la clé La clé est l'équation 11.4 : (v) 11.2 — L'auto-induction Résoudre le problème Nous calculons d'abord l'inductance mutuelle du système : 379 Nous obtenons ensuite la f.é.m. en remplaçant ce résultat dans l'équation (v) : (réponse) Valider la réponse Nous répondons à la question. Les quantités doivent être exprimées dans le SI pour que les réponses soient formulées dans le même système.

11.2 L'auto-induction La figure 11.4 montre une bobine qui fait partie d'un circuit.

La bobine produit un champ magnétique lorsqu'elle est parcourue par un courant i.

Les lignes de champ magnétique traversent la bobine. Il y a donc un flux magnétique ΦB à travers chaque spire de la bobine, causé par le champ magnétique produit par la bobine elle-même. Le flux magnétique à travers la bobine complète est Φbobine = NΦB. Si le courant change dans la bobine, le flux magnétique à travers celle-ci va changer, ce qui induit une f.é.m., selon la loi de Faraday. Le flux magnétique ΦB à travers une spire de la bobine est proportionnel au courant i circulant dans la bobine. On définit l'inductance de la bobine comme le flux total qui la traverse par unité de courant : (11.7) où N est le nombre de spires de la bobine et ΦB, le flux magnétique à travers une spire.

L'inductance d'une bobine est indépendante du courant qui circule. Elle ne dépend que des propriétés géométriques de la bobine. Comme dans le cas de l'inductance mutuelle, l'inductance d'une bobine est mesurée en henrys (H). Le physicien américain Joseph Henry (1797-1878) a découvert le phénomène d'auto-induction à peu près au même moment que Faraday a mis en évidence l'induction électromagnétique. Tous les éléments d'un circuit peuvent avoir une certaine inductance, car ils sont traversés par les lignes de champ qu'ils produisent eux-mêmes. Cependant, l'inductance est importante seulement lorsque des éléments génèrent un champ magnétique important, comme des bobines ou des solénoïdes. On appelle bobine d'induction* un dispositif qui est utilisé dans un circuit pour ajouter de l'inductance. On utilise le symbole pour représenter ce dispositif dans les schémas. Une bobine d'induction idéale a une résistance R nulle. Les bobines réelles ont une certaine résistance, qu'on peut négliger si cette dernière est beaucoup plus faible que les autres résistances du circuit. On peut remplacer une bobine d'induction ayant une résistance importante par une bobine d'induction idéale branchée en série à une résistance. * On utilise aussi les termes inductance et self, mais l'expression privilégiée est bobine d'induction. FIGURE 11.4 Un courant i circule dans une bobine. Si ce courant change, une f.é.m. est induite dans la bobine. Inductance 380 CHAPITRE 11 — L'inductance L'inductance d'un solénoïde La bobine d'induction la plus simple est un solénoïde de N spires, une longueur et une aire transversale A. Si on fait l'approximation que le solénoïde est idéal, alors le champ magnétique est uniforme et il est perpendiculaire au plan des spires. Lorsque le solénoïde est parcouru par un courant i, le module du champ magnétique est donné par l'équation 8.6 : Le flux magnétique à travers une spire est On insère ce résultat dans la définition de l'inductance, donnée par l'équation 11.7 : (11.8) Comme le montre la relation 11.8, l'inductance ne dépend que des propriétés géométriques de la bobine, comme le nombre de spires, la longueur et l'aire transversale. L'équation 11.8 est une bonne approximation dans le cas de solénoïdes dont la longueur est beaucoup plus grande que le rayon. Dans cette approximation, on néglige les effets de bord, en supposant que les lignes de champ sont toujours perpendiculaires aux spires, ce qui n'est pas réellement le cas aux extrémités du solénoïde. Dans l'équation 11.8, l'inductance se mesure en henrys, l'aire en mètres carrés et la longueur, en mètres. Ceci montre que la constante magnétique peut s'exprimer en henrys par mètre. C'est habituellement la forme utilisée dans les tables de référence : (11.9) La f.é.m. d'auto-induction Si le courant dans une bobine change, il y a une f.é.m. induite dans la bobine. Selon la loi de Faraday (voir l'équation 10.5 de la page 343), D'après l'équation 11.7, NΦB = Li, ce qui donne F.é.m. d'auto-induction dans une bobine (11.10) Le signe négatif est une conséquence de la loi de Lenz : la f.é.m. induite dans la bobine s'oppose à la variation de courant. 11.2 — L'auto-induction 381 • Si le courant augmente, di/dt > 0, et la polarité de EL est telle que la borne positive de la f.é.m. est du côté où le courant entre dans la bobine d'induction. • Si le courant diminue, di/dt < 0, et la polarité de EL est telle que la borne négative de la f.é.m. est du côté où le courant entre dans la bobine. • Si le courant est constant, di/dt = 0 et EL = 0. La bobine d'induction se comporte comme un simple fil et il n'y a pas de f.é.m. induite. Lorsqu'une bobine fait partie d'un circuit, on peut analyser ce dernier à l'aide de la loi des mailles. La différence de potentiel aux bornes de la bobine d'induction correspond à la f.é.m. induite si on se déplace dans le même sens que le courant.

La f.é.m.

induite dans une bobine peut être fort importante lorsque le courant change très rapidement. C'est le cas lorsqu'on ouvre rapidement un interrupteur, comme le montre la figure 11.5. Avant d'ouvrir l'interrupteur, un courant i continu circule dans la bobine. Si on ouvre rapidement l'interrupteur, le courant tombe très vite à zéro. Il y a alors une f.é.m. induite très importante dans la bobine d'induction. Dans ce cas, la différence de potentiel entre le levier et le contact de l'interrupteur peut être suffisamment grande pour générer un champ électrique qui dépasse la valeur de la rigidité diélectrique de l'air (3 MV/m). Une décharge (une étincelle électrique) est alors produite. (a) (b) FIGURE 11.5 (a) Un courant i constant circule dans la bobine. (b) Lorsqu'on ouvre très rapidement l'interrupteur, la f.é.m. induite dans la bobine produit une décharge dans l'interrupteur. Ce phénomène peut être observé lorsqu'on débranche un appareil dans lequel circule un courant important, comme un grille-pain ou un séchoir à cheveux. Les bougies d'allumage des moteurs à essence fonctionnent aussi de cette façon. Un courant important circule dans une bobine d'induction. Un interrupteur à l'intérieur du distributeur s'ouvre, ce qui produit une grande différence de potentiel, de quelques milliers de volts. Le champ électrique généré entre les électrodes de la bougie est suffisamment intense pour produire une étincelle électrique, comme le montre la figure 11.6. FIGURE 11.6 Une décharge entre les électrodes d'une bougie d'allumage 382 CHAPITRE 11 — L'inductance TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 11.1 Dans la figure suivante, V b < Va : Parmi les affirmations suivantes, lesquelles sont possibles ? (i) Le courant est constant, et il est vers la droite. (ii) Le courant est constant, et il est vers la gauche. (iii) Le courant est vers la droite, et il augmente. (iv) Le courant est vers la droite, et il diminue. (v) Le courant est vers la gauche, et il augmente. (vi) Le courant est vers la gauche, et il diminue. EXEMPLE 11.2 Une haute tension Une différence de potentiel de 12,0 kV est nécessaire dans une bougie d'allumage pour enflammer le mélange air-essence. La bobine d'induction utilisée a une inductance de 0,600 H.

Quel est le taux de variation du courant dans le circuit ?

SOLUTION Décortiquer le problème Résoudre le problème Nous isolons le taux de variation du courant : Nous utilisons des valeurs absolues, car le sens de la f.é.m. n'a pas d'importance ici. Valider la réponse Identifier la clé La clé est l'équation 11.10, en ajoutant des valeurs absolues : (i) 11.3 FIGURE 11.7 Le circuit RL, avec une résistance et une bobine d'induction (réponse) Le taux de variation du courant nécessaire est très grand. Ceci est possible si le courant est coupé très rapidement.

Par exemple, si un courant diminue de 20 A à 0 A en 1 ms, le taux moyen obtenu est de 20 × 10^3 A/s. Le circuit RL Lorsqu'il y a une bobine d'induction dans un circuit, le courant ne peut pas changer brusquement, car la variation de courant induit une f.é.m. dans la bobine, qui s'oppose à la variation de courant. Pour comprendre ce phénomène, on étudie un circuit dans lequel il y a une résistance et une bobine d'induction, avec au besoin une pile.

C'est ce qu'on appelle un circuit RL. La figure 11.7 présente le circuit RL, avec une résistance R, une bobine d'induction ayant une inductance L et une pile dont la f.é.m. est E. L'interrupteur peut être placé à la position a pour que la pile soit incluse dans le circuit ou à la position b pour exclure la pile. Dans la situation présentée à la figure 11.7, l'interrupteur est ouvert, et aucun courant ne circule dans le circuit.

Le courant en croissance On ferme l'interrupteur à la position a pour inclure la pile à t = 0. Le courant initial doit être nul, car à la fermeture de l'interrupteur, la bobine d'induction 11.3 — Le circuit RL génère une f.é.m. d'auto-induction EL, qui s'oppose à la variation de courant. À mesure que le temps passe, le courant i augmente graduellement. La figure 11.8a illustre la situation pour t > 0. Lorsque t → ∞, le courant ne change plus, et la bobine ne produit plus de f.é.m. d'auto-induction. La bobine se comporte comme un fil de résistance négligeable.

Le circuit est alors simplement constitué d'une pile et d'une résistance, qui sont reliées par des fils. Le courant est i = im = E/R, la valeur maximale du courant, comme le montre la figure 11.8b. (a) (b) FIGURE 11.8 (a) Pour t > 0, le courant dans le circuit est i.

(b) Lorsque t → ∞, le courant devient constant : i = im = E/R. Pour obtenir le courant en fonction du temps, on applique la loi des mailles au circuit de la figure 11.8a, à partir du point e, en sens horaire : (11.11) • La pile est traversée de la borne − à la borne + : ΔVE = +E. • La résistance est traversée dans le même sens que le courant : ΔV R = −Ri. • La bobine est traversée dans le même sens que le courant : ΔV L = −L di/dt. Cette différence de potentiel doit être négative, car la f.é.m.

d'auto-induction doit s'opposer à la variation de courant. On obtient alors (11.12) Cette équation différentielle a la même forme que l'équation obtenue lors de l'étude du circuit RC, pour un condensateur en train d'être chargé (voir l'équation 7.34 de la page 240) : La solution obtenue est où Qm représente la charge maximale, trouvée lorsque t → ∞. On peut appliquer la même méthode que celle qui a été utilisée à la section 7.7. On peut aussi simplement se servir de la solution de l'équation 7.34 en remplaçant les symboles Q → i, 1/C → R et R → L.

On obtient alors le courant en fonction du temps : (11.13) Courant d'un circuit RL (en croissance) 383 384 CHAPITRE 11 — L'inductance La figure 11.9 montre le graphique du courant en fonction du temps. À t = 0, le courant est nul, car la f.é.m. de la bobine d'induction annule complètement la f.é.m. de la pile. Lorsque t → ∞, la bobine n'a plus d'effet, et le courant a atteint sa valeur maximale i = im. En insérant dans l'équation 11.12 et i = im, on trouve que le courant maximal est (11.14) FIGURE 11.9 Le courant en fonction du temps dans le circuit RL lorsque le courant augmente La constante τ représente la constante de temps du circuit RL : (11.15) Comme dans le cas du circuit RC, la constante de temps indique si le courant augmente rapidement ou non. Après un temps correspondant à la constante de temps (t = τ), le courant a atteint la valeur i = im(1 − e−1), ce qui représente environ 63 % de la valeur maximale. Le courant augmente rapidement (lorsque τ est faible) dans le cas où l'inductance de la bobine est faible (il y a peu d'auto-induction) ou quand la résistance est élevée (ce qui implique un faible courant final). Le courant en décroissance Notre but est maintenant d'analyser le circuit RL lorsque le courant décroît. Pour ce faire, on place l'interrupteur à la position b, à t = 0, lorsque le courant est i = im. Ceci a pour effet d'enlever la pile du circuit. Le courant ne peut pas tomber à zéro brusquement, car la bobine d'induction génère une f.é.m. d'autoinduction qui s'oppose à la variation de courant. À un temps t > 0, la situation est illustrée à la figure 11.10. La f.é.m.

d'auto-induction EL permet au courant de continuer de circuler en sens horaire dans le circuit. FIGURE 11.10 On applique de nouveau la loi des mailles pour analyser le circuit de la figure 11.10, en commençant au point e, en sens antihoraire : À un temps t > 0, le courant dans le circuit est i. (11.16) Cette fois-ci, puisque le courant diminue (di/dt < 0), la différence de potentiel de la bobine d'induction est positive.

Encore une fois, nous avons vu une équation différentielle semblable dans l'étude des circuits RC à la section 7.7. La solution est un courant qui diminue de façon exponentielle : Courant d'un circuit RL (en décroissance) (11.17) La figure 11.11 illustre le graphique du courant en fonction du temps. La constante de temps τ = L/R est la même que dans le cas où le courant est croissant.

Après t = τ, le courant a diminué à i = im e−1, ce qui représente environ 37 % de la valeur maximale. Lorsque t → ∞, le courant tend vers zéro, car la bobine ne produit plus d'auto-induction. Les cas limites FIGURE 11.11 Le courant en fonction du temps dans un circuit RL lorsque le courant décroît Les équations obtenues représentent le courant en fonction du temps pour les circuits RL en régime transitoire. Ces équations permettent aussi d'obtenir le comportement des bobines d'induction au moment où on ferme l'interrupteur (t = 0) et dans le régime permanent (t → ∞). 11.3 — Le circuit RL 385 Le courant en croissance • Lorsque t → 0, le courant initial est nul (i = 0). La bobine s'oppose à la variation de courant, donc elle se comporte comme un interrupteur ouvert. • Lorsque t → ∞, la bobine n'a plus d'effet. Elle se comporte comme un simple fil et i → im. Le courant en décroissance • Lorsque t = 0, le courant est i = im, et la bobine s'oppose à la variation. Elle génère une f.é.m. d'auto-induction EL pour que le courant soit i = im. • Lorsque t → ∞, la bobine n'a plus d'effet. Elle se comporte comme un simple fil et i → 0. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 11.2 La figure suivante montre le courant en fonction du temps dans deux circuits RL à l'intérieur desquels une source de f.é.m.

est débranchée du circuit à t = 0, de telle sorte que le courant peut continuer à circuler dans le circuit. Les circuits possèdent des résistances identiques. a. Quel circuit a la constante de temps la plus élevée ? Défi animé 11.1 Pour un circuit RL en série, pouvezvous prédire l'allure de la différence de potentiel aux bornes de la résistance et de la bobine lorsque ces composants sont reliés à une pile ? b. Quel circuit a une inductance plus élevée ? EXEMPLE 11.3 Un circuit RL On branche un circuit RL, constitué d'une résistance et d'une bobine d'induction, qui sont branchées en série avec une pile de 6,00 V. La résistance est R = 200 Ω, et l'inductance de la bobine est L = 240 mH. a. Quel est le courant maximal dans le circuit ? b. Après combien de temps le courant est-il égal à 10,0 mA ? c. Quelle est la différence de potentiel aux bornes de la bobine lorsque t = 2,00 ms ? SOLUTION Décortiquer le problème SOLUTION a. Identifier la clé La clé est que le courant est maximal lorsque t → ∞ après avoir branché le circuit à la batterie : (ii) Le courant est en croissance, car le circuit est branché à une pile. La constante de temps du circuit RL est (i) Résoudre le problème Nous obtenons (réponse) 386 CHAPITRE 11 — L'inductance SOLUTION b. Identifier la clé (iv) La clé est l'équation 11.13 : (iii) Résoudre le problème Résoudre le problème Nous calculons ΔV L à l'aide de la dérivée de l'équation 11.13 : Nous isolons t dans l'équation (iii) : Nous remplaçons les valeurs : (réponse) (réponse) SOLUTION c. Identifier la clé La clé est que la différence de potentiel aux bornes de la bobine correspond à la valeur absolue de la f.é.m. d'auto-induction : EXEMPLE 11.4 Valider la réponse Les valeurs obtenues sont positives.

La différence de potentiel aux bornes de la bobine d'induction est plus faible que la f.é.m.

de la pile, ce qui est correct pour t > 0.

Un circuit RL plus complexe Dans le circuit ci-contre, R_1 = 200 Ω, R_2 = 300 Ω, L = 45,0 mH et E = 12,0 V. On ferme l'interrupteur à t = 0. a. Calculez le courant qui circule dans la pile à t = 0. b. Calculez le courant qui circule dans la pile lorsque t → ∞. SOLUTION Décortiquer le problème est le même que celui qui circule dans la résistance R_1. SOLUTION a. Identifier la clé La clé est qu'en fermant l'interrupteur, la bobine se comporte comme un interrupteur ouvert.

Le circuit est donc équivalent à celui de la figure 11.12. Il n'y a pas de courant dans la résistance R_2. Le courant FIGURE 11.12 Le circuit équivalent à t = 0 11.4 — L'énergie emmagasinée dans une bobine d'induction Nous trouvons ensuite le courant à l'aide de ce circuit équivalent : 387 Nous obtenons un circuit simple, comme le montre la figure 11.14. (i) Résoudre le problème (réponse) FIGURE 11.14 Le circuit équivalent lorsque t → ∞ SOLUTION b. Identifier la clé La clé est que lorsque t → ∞, la bobine d'induction se comporte comme un fil. Le circuit équivalent est donné à la figure 11.13. Dans ce circuit, les résistances sont en parallèle.

Le courant dans la pile est alors (iii) Résoudre le problème Nous calculons d'abord la résistance équivalente en remplaçant les valeurs dans l'équation (ii) : (iv) FIGURE 11.13 Le circuit équivalent lorsque t → ∞ La résistance équivalente est obtenue à l'aide de l'équation 7.18 de la page 215 : (iii) (réponse) Valider la réponse Le courant dans la pile est plus grand lorsque t → ∞. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 11.3 Classez les constantes de temps des circuits RL suivants selon un ordre croissant. (i) 11.4 (ii) (iii) L'énergie emmagasinée dans une bobine d'induction Dans la section 11.3, nous avons vu que lorsqu'on débranche la pile reliée à une bobine, celle-ci génère une f.é.m. d'auto-induction qui empêche le courant de tomber à zéro subitement. La résistance continue alors de dissiper de l'énergie, 388 CHAPITRE 11 — L'inductance car elle est parcourue par un courant. Comme le circuit est isolé, l'énergie doit être emmagasinée quelque part dans le circuit, donc dans la bobine d'induction, car c'est le seul autre élément du circuit. Pour calculer cette énergie, revenons au circuit RL branché à une pile.

Selon l'équation 11.12, obtenue à partir de la loi des mailles, (11.18) Selon l'équation 6.28 de la page 197, la puissance fournie par la pile est PE = Ei. On obtient alors la puissance de la pile dans le circuit RL en multipliant les deux membres de l'équation 11.18 par le courant i : (11.19) Le membre gauche correspond à la puissance de la pile. Le premier terme du membre droit représente la puissance dissipée dans la résistance (voir l'équation 6.30). Le deuxième terme est donc la puissance emmagasinée dans la bobine : (11.20) Lorsque le courant augmente (di/dt > 0), la puissance est positive, ce qui indique que la bobine emmagasine de l'énergie. Lorsque le courant diminue (di/dt < 0), la bobine fournit de l'énergie au circuit. Il n'y a pas d'énergie emmagasinée quand le courant dans la bobine est nul. Lorsqu'un courant i circule dans une bobine d'induction, il y a de l'énergie potentielle magnétique, qui peut être fournie au circuit lorsque le courant diminue. Pour calculer l'énergie totale emmagasinée, on doit calculer l'intégrale de la puissance : (11.21) Énergie d'une bobine Cette équation représente l'énergie emmagasinée dans une bobine lorsque celle-ci est parcourue par un courant i. La bobine emmagasine de l'énergie grâce au champ magnétique qu'elle produit, comme le condensateur emmagasine de l'énergie électrique grâce au champ électrique qu'il produit. REMARQUE Dans l'intégrale, le symbole a été utilisé pour représenter le courant intermédiaire dans la bobine, afin de le différencier du courant final i. 11.4 — L'énergie emmagasinée dans une bobine d'induction EXEMPLE 11.5 389 L'énergie dans un circuit RL Une bobine d'induction, ayant une inductance de 0,330 H et une résistance de 15,0 Ω, est branchée à une source de f.é.m. de 20,0 V à t = 0.

Après un intervalle de temps égal à la constante de temps, calculez l'énergie emmagasinée dans la bobine. SOLUTION Décortiquer le problème (ii) Résoudre le problème Nous calculons d'abord le courant à l'aide de l'équation (ii) : Le courant est en croissance. (iii) Identifier les clés La première clé est l'équation 11.21 qui permet de calculer l'énergie emmagasinée dans une bobine d'induction : Nous obtenons alors l'énergie dans la bobine : (réponse) (i) Valider la réponse La deuxième clé est l'équation 11.13 pour calculer le courant dans un circuit RL lorsque celui-ci est en croissance : Nous répondons à la question. Le courant obtenu est plus faible que le courant maximal (i_m = E/R = 1,33 A). La densité d'énergie magnétique Il est possible d'exprimer l'énergie magnétique en fonction du module du champ magnétique présent. Prenons par exemple un long solénoïde parcouru par un courant i.

Selon l'équation 11.8, l'inductance est L'énergie magnétique dans le solénoïde, lorsque celui-ci est parcouru par un courant i, est Selon l'équation 8.26 de la page 281, le module du champ magnétique d'un long solénoïde est . On peut alors réécrire l'énergie magnétique de la façon suivante : (11.22) Le terme représente le volume du solénoïde, c'est-à-dire le volume où il y a un champ magnétique (en supposant que le solénoïde est idéal, avec un champ à l'intérieur et aucun champ à l'extérieur). Donc, l'énergie magnétique est emmagasinée dans le champ magnétique, de la même façon que l'énergie électrique est emmagasinée dans le champ électrique. 390 CHAPITRE 11 — L'inductance On définit la densité d'énergie magnétique comme l'énergie magnétique par unité de volume : (11.23) Densité d'énergie magnétique La densité magnétique se mesure en joules par mètre cube, et elle dépend du carré du module du champ magnétique. On a trouvé la densité d'énergie ma gnétique à partir d'un cas particulier. Il est cependant possible d'obtenir la même relation à l'aide d'un calcul général, mais qui dépasse le contexte de cet ouvrage. À première vue, il semble surprenant de voir qu'un champ magnétique trans porte une certaine densité d'énergie, car le champ magnétique ne peut pas effec tuer un travail sur les particules chargées. En effet, la force magnétique sur une particule chargée est toujours perpendiculaire au déplacement de la particule. Par contre, si le champ magnétique change, cela induit un champ électrique qui, lui, peut effectuer un travail sur une particule chargée. De façon générale, lorsqu'il y a simultanément un champ électrique et un champ magnétique dans une région, il y a aussi une densité d'énergie électro-magnétique, qui correspond à la somme de la densité d'énergie électrique et de la densité d'énergie magnétique : (11.24) Cette relation sera utile dans le tome 3, lorsqu'il faudra calculer l'énergie trans portée par la lumière, car celleci est constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 11.4 La figure suivante montre quatre points situés près d'un long fil parcouru par un courant i. Classez les points selon un ordre croissant de la densité d'énergie magnétique à ces points.

EXEMPLE 11.6 L'énergie d'une onde radio Une onde radio est composée d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Calculez la densité d'énergie électrique et la densité d'énergie magnétique à un endroit où le champ électrique a un module de 5,31 V/m et le champ magnétique, un module de 1,77 × 10^{-8} T. 11.5 — Les oscillations dans un circuit LC SOLUTION Décortiquer le problème 391 Résoudre le problème Nous remplaçons les valeurs : (réponse) Identifier la clé La clé est l'équation 11.24, dont le premier terme donne la densité d'énergie électrique et le deuxième, la densité d'énergie magnétique : (réponse) Valider la réponse (i) (ii) 11.5 Nous avons trouvé la même valeur pour les deux densités d'énergie. Nous verrons dans le tome 3 que ce n'est pas un hasard : une onde radio transporte toujours autant d'énergie électrique que d'énergie magnétique. Les oscillations dans un circuit LC Pour fonctionner, les téléphones cellulaires et les radios utilisent des circuits électriques dans lesquels le courant électrique oscille, c'est-à-dire qu'il varie de façon périodique. Ceci est possible dans les circuits qui contiennent des bobines d'induction et des condensateurs. Un circuit LC comprend une bobine d'induction, dont l'inductance est L, branchée à un condensateur, dont la capacité est C (voir la figure 11.15).

On suppose que la résistance du circuit est négligeable. On suppose aussi que le condensateur a une charge initiale Q_m sur son armature positive avant la fermeture de l'interrupteur. On ferme l'interrupteur à t = 0. En fermant l'interrupteur, le condensateur peut se décharger. Les charges se déplacent d'une armature à l'autre, ce qui produit un courant i. La bobine génère une f.é.m. d'auto-induction qui s'oppose à la variation de courant, ce qui fait que le courant augmente graduellement. De même, lorsque le condensateur est déchargé, le courant dans le circuit ne peut pas tomber à zéro brusquement, car la bobine induit une f.é.m. qui s'oppose à la diminution du courant. Le comportement de ce circuit est semblable à celui d'un système mécanique, composé d'un bloc attaché à un ressort, qui glisse sur une surface horizontale sans frottement. Lorsqu'on ferme le circuit, cela correspond au bloc qu'on laisse aller avec le ressort étiré à une position x_m (voir la figure 11.16a à la page suivante). Le bloc ne s'arrête pas lorsqu'il revient à la position d'équilibre du ressort, comme le courant qui continue de circuler dans le circuit lorsque le condensateur est déchargé (voir la figure 11.16b). Ceci va charger le condensateur selon la polarité opposée à celle au départ, comme le bloc qui comprime le ressort, jusqu'à une position $-x_m$, avant de s'arrêter. Le courant est nul dans le circuit, mais le condensateur est chargé (voir la figure 11.16c). Les charges vont se déplacer, créant un courant opposé au courant précédent, comme le bloc qui se déplace vers la droite à cause de la force exercée par le ressort (voir la figure 11.16d). Le condensateur se décharge complètement (le bloc revient à la position d'équilibre), mais la bobine s'oppose à la variation de courant, ce qui FIGURE 11.15 Un circuit LC 392 CHAPITRE 11 — L'inductance charge de nouveau le condensateur. Lorsque la charge sur l'armature supérieure est Q = Q_m, le courant est nul. C'est l'état initial du circuit (voir la figure 11.16a). Le cycle recommence. La charge Q et le courant i oscillent. FIGURE 11.16 Le circuit LC et son équivalent mécanique. (a) La charge est maximale, et le courant est nul.

(b) Le courant est maximal lorsque le condensateur est déchargé. (c) Le courant est nul lorsque le condensateur est complè tement chargé. (d) Le condensateur est complètement déchargé, et le courant est maximal. Pour analyser la situation, on utilise de nouveau la loi des mailles, pour une situation intermédiaire, où la charge du condensateur est Q et le courant dans le circuit est i, comme à la figure 11.17. On commence l'analyse au point a en décrivant la maille en sens horaire : (11.25) Dans cette équation, il y a deux variables : Q et i. On sait que le courant représente la valeur absolue du taux de variation de la charge. Dans notre cas, la charge Q du condensateur diminue, ce qui produit un courant positif. Alors, (11.26) FIGURE 11.17 Le circuit LC dans un état intermédiaire En insérant l'équation 11.26 dans l'équation 11.25, on obtient une équation différentielle du deuxième ordre : 11.5 — Les oscillations dans un circuit LC (11.27) On peut montrer que la solution de l'équation 11.27 est une fonction trigonométrique. Comme la charge à t = 0 est Q = Q_m, on trouve (11.28) Cette fonction représente la charge sur l'armature supérieure en fonction du temps, et elle est représentée à la figure 11.18. La charge est une fonction périodique, qui varie de Q_m (la charge maximale) à $-Q_m$. De façon générale, on appelle l'amplitude la valeur absolue du paramètre qui multiplie la fonction trigonométrique ; l'amplitude est toujours une valeur positive. La constante Q_m est donc appelée l'amplitude de la charge. Le temps pour effectuer un cycle est appelé la période T. La constante ω est appelée la fréquence angulaire des oscillations dans le circuit LC, reliée à la période T et à la fréquence (l'inverse de la période) : (11.29) FIGURE 11.18 (11.30) La charge (Q) et le courant (i) en fonction du temps. Les instants de la figure 11.16 sont indiqués en pointillé. La fréquence angulaire est une propriété du circuit : elle dépend des valeurs de la capacité et de l'inductance, mais elle est indépendante de la charge initiale ou du courant dans le circuit. On calcule le courant dans le circuit à l'aide de l'équation 11.26 : (11.31) Le courant est aussi une fonction périodique.

Cette fonction est présentée à la figure 11.18. Une valeur positive représente un courant en sens horaire, alors qu'une valeur négative représente un courant en sens antihoraire, dans le circuit de la figure 11.15. La fréquence angulaire ω est la même que pour la charge et elle est donnée par l'équation 11.30. L'amplitude du courant (la valeur maximale) est (11.32) EXEMPLE 11.7 La radio AM Un circuit LC est composé d'un bobine d'induction de 1,10 mH. Le circuit doit avoir une fréquence d'oscillation de 730 kHz pour avoir la même fréquence qu'une onde radio AM. a. Quelle est la capacité du condensateur ? b.

Si la charge maximale sur le condensateur est de 3,4 × 10^{-12} C, quel est le courant maximal dans le circuit ? 393 394 CHAPITRE 11 — L'inductance SOLUTION a. Décortiquer le problème SOLUTION b. Identifier la clé La clé est l'équation 11.32, qui relie la charge maximale et le courant maximal : (ii) Résoudre le problème Identifier la clé Nous remplaçons les valeurs : La clé est l'équation 11.30 : (i) (réponse) Résoudre le problème Valider la réponse Nous obtenons Nous répondons aux questions. La réponse de la question b. a été arrondie à deux chiffres significatifs, car la charge maximale est connue avec seulement deux chiffres significatifs. (réponse) TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 11.5 Dans un circuit LC, on ferme l'interrupteur à t = 0, lorsque la charge est Q = Q_m et le courant, i = 0. La période d'oscillation est de 10 ms. À quel instant les conditions suivantes se produisent-elles pour la première fois ? a. Le courant i = i_m. b. Le courant est i = $-i_m$. c. La charge du condensateur est Q = $-Q_m$. L'énergie dans le circuit LC À t = 0, le condensateur est pleinement chargé. Le condensateur a emmagasiné de l'énergie électrique. À mesure que le condensateur se décharge, cette énergie diminue. En même temps, le courant augmente et la bobine emmagasine de l'énergie magnétique. Lorsque le condensateur est complètement déchargé, il n'y a plus d'énergie électrique ; toute l'énergie est sous forme d'énergie magnétique dans la bobine. L'énergie magnétique se retransforme en énergie électrique, à mesure que le condensateur se recharge. Il y a donc une transformation d'énergie électrique en énergie magnétique, et inversement.

Prenons une situation intermédiaire, lorsque la charge du condensateur est Q, donnée par l'équation 11.28, et le courant est i, donné par l'équation 11.31. L'énergie électrique dans un condensateur est donnée par l'équation 5.16 de la page 172 : (11.33) 11.6 — Les oscillations amorties dans un circuit RLC L'énergie magnétique emmagasinée dans une bobine d'induction est donnée par l'équation 11.21 : Selon l'équation 11.30, ω^2 = 1/(LC), ce qui implique que l'énergie magnétique est (11.34) La figure 11.19 montre le graphique des deux types d'énergie en fonction du temps. Lorsque l'énergie électrique est maximale, l'énergie magnétique est nulle, et vice versa. De plus, l'énergie mécanique du système doit être conservée, car la résistance du circuit est négligeable. Si on additionne l'énergie électrique, emmagasinée dans le condensateur, et l'énergie magnétique, emmagasinée dans la bobine, on obtient (11.35) L'énergie mécanique est bien conservée. 11.6 Les oscillations amorties dans un circuit RLC À la section 11.5, nous avons étudié un circuit constitué d'un condensateur et d'une bobine d'induction, branchés ensemble avec des fils de résistance négligeable. Que se passe-t-il si la résistance du circuit n'est pas négligeable ? D'abord, l'énergie mécanique du système devrait diminuer graduellement, car la résistance parcourue par un courant va transformer l'énergie électrique en énergie thermique.

Ceci devrait faire diminuer la charge du condensateur lorsque le courant est nul. La figure 11.20 montre un circuit RLC en série, constitué d'une résistance R, d'un condensateur, ayant une capacité C, et d'une bobine d'induction, ayant une inductance L, branchés en série. On suppose que la charge initiale est Q_m et que l'interrupteur est fermé à t = 0. La figure 11.21 montre une situation intermédiaire, lorsque le courant dans le circuit est i et que la charge sur le FIGURE 11.20 FIGURE 11.21 Un circuit RLC en série. La charge initiale sur le condensateur est Q m. Le circuit RLC dans un état intermédiaire FIGURE 11.19 L'énergie électrique et l'énergie magnétique du circuit LC en fonction du temps. Les instants correspondants à la figure 11.16 sont indiqués en pointillé. 395 396 CHAPITRE 11 — L'inductance condensateur est Q. Pour analyser ce circuit, on applique la loi des mailles, en commençant au point a, en sens horaire : (11.36) L'équation 11.36 a deux variables, Q et i.

De nouveau, on remplace le courant par l'opposé du taux de variation de la charge, car la charge diminue pour produire le courant : L'équation 11.36 s'écrit alors (11.37) C'est une équation différentielle du second ordre. La solution dépend de la valeur de R par rapport aux autres paramètres du circuit. Pour une faible résistance, la charge en fonction du temps doit ressembler aux résultats obtenus avec le circuit LC. On obtient une oscillation amortie, illustrée dans le graphique de la figure 11.22 : (11.38) La fréquence de l'oscillation amortie ω_a est (11.39) La fréquence angulaire est plus faible que dans le cas de l'oscillation non amortie (où ce qui produit une période d'oscillation plus grande que dans ce dernier cas. La présence de la résistance produit des cycles plus longs. Par rapport à l'oscillation dans un circuit LC, l'amplitude de l'oscillation (ce qui multiplie la fonction cosinus) n'est pas une constante, mais elle décroît de façon exponentielle : (11.40) Dans le graphique de la figure 11.22, la ligne en pointillé indique l'amplitude. La constante Q_m représente l'amplitude initiale, c'est-à-dire la charge maximale présente uniquement au temps initial. On peut dire qu'à chaque cycle, la charge du condensateur est plus faible que la charge du cycle précédent. Après un certain nombre de cycles, le condensateur ne se charge plus de façon suffisante. FIGURE 11.22 La charge en fonction du temps dans le circuit RLC, ce qui produit des oscillations amorties 11.6 — Les oscillations amorties dans un circuit RLC 397 Si la résistance est plus grande, de telle sorte que ω_a = 0, il n'y a plus réellement d'oscillation, car le condensateur ne se charge pas de nouveau. On parle alors de régime critique. Dans ces conditions, le circuit revient à un état d'équilibre (Q = 0 et i = 0) le plus rapidement. La valeur critique de la résistance est (11.41) C'est dans le régime critique que l'énergie électromagnétique se dissipe le plus rapidement en énergie thermique. Si R > R_c, le circuit est en régime surcritique. Le circuit revient plus lentement à l'état d'équilibre, car la résistance est très élevée, ce qui produit un faible courant pour décharger le condensateur. Le graphique de la figure 11.23 montre la charge en fonction du temps dans le régime critique et dans le régime surcritique. FIGURE 11.23 La charge en fonction du temps dans un régime critique et dans un régime surcritique EXEMPLE 11.8 L'amplitude diminue Un circuit RLC contient une bobine, ayant une inductance L = 0,400 H, un condensateur, dont la capacité est C = 4,60 μC, et une résistance R = 40,0 Ω. On ferme l'interrupteur à t = 0, lorsque Q = Q_m. a. Après combien de temps l'amplitude de la charge a-t-elle diminué de moitié, par rapport à la valeur initiale ? b. Combien d'oscillations se sont produites pendant ce temps ? SOLUTION Décortiquer le problème (i) Résoudre le problème Nous remplaçons les valeurs et nous isolons t : Comme ln(1/2) = − ln(2), nous obtenons SOLUTION a. Identifier la clé La clé est que l'amplitude diminue selon l'équation 11.40 : (réponse) 398 CHAPITRE 11 — L'inductance SOLUTION b. Identifier la clé Résoudre le problème Nous calculons d'abord La clé est que la période représente le temps que dure une oscillation. Nous trouvons donc le nombre d'oscillations en divisant le temps par la période : (ii) où la période est calculée à partir de la fréquence angulaire, donnée par l'équation 11.39 : (iv) En insérant ce résultat dans l'équation (ii), nous obtenons (iii) (réponse) Valider la réponse L'amortissement est important, car l'amplitude diminue de moitié après à peine plus d'une oscillation et demie. RÉSUMÉ QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 399 RÉSUMÉ Dans ce chapitre, nous avons introduit la notion d'inductance et avons analysé les circuits comportant des bobines d'induction. LES DÉFINITIONS • Pour un système composé d'une bobine de N_1 spires, parcourue par un courant i_1, et d'une bobine de N_2 spires, parcourue par un courant i_2, l'inductance mutuelle du système est LES LOIS ET LES PRINCIPES • Dans un système composé de deux bobines, lorsque le courant change dans la première bobine, il y a une f.é.m. induite dans la deuxième bobine : • Lorsque le courant change dans une bobine, il y a une f.é.m. d'auto-induction dans la bobine : • Pour une bobine de N spires, parcourue par un courant i, l'inductance de la bobine est • Une bobine d'induction, parcourue par un courant i, emmagasine une énergie magnétique : • L'inductance d'un solénoïde idéal de N spires, ayant une longueur et une aire transversale A, est • La densité d'énergie magnétique est l'énergie magnétique par unité de volume présente à un endroit : LES APPLICATIONS Un circuit RL comprend une résistance et une bobine d'induction.

La constante de temps du circuit est Un circuit LC comprend un condensateur et une bobine d'induction. • La charge et le courant oscillent : • Lorsque le courant augmente, • L'amplitude de la charge est Q_m, et l'amplitude du courant est i_m = ωQ_m. • Lorsque le courant diminue, • La fréquence angulaire des oscillations est Un circuit RLC est constitué d'une résistance, d'une bobine d'induction et d'un condensateur. La charge effectue une oscillation amortie : où la fréquence angulaire est 400 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Q questions qualitatives • E exercices simples • P problèmes •• R problèmes solution disponible récapitulatifs • solution disponible Section 11.1 L'inductance mutuelle a. Calculez l'inductance mutuelle du système. E1 Un système constitué de deux bobines de 100 spires cha- b. Calculez la grandeur de la f.é.m. induite dans le solénoïde si le taux de variation du courant dans la bobine est de 40,0 A/s. cune, ayant une résistance de 1,26 Ω, possède une inductance mutuelle de 34,5 mH. Dans la deuxième bobine, le taux de variation du courant est de 3,75 A/s. a. Quelle est la grandeur de la f.é.m. induite dans la première bobine ? b. Quel est le courant induit dans la première bobine ? E2 Le courant dans un solénoïde est donné par où t est mesuré en secondes et i, en ampères. Une bobine ayant une résistance de 0,700 Ω est située près du solénoïde. À t = 1,50 s, un courant de 65,0 mA circule dans la bobine. Quelle est l'inductance mutuelle du système ? P3 Une bobine carrée de 100 spires, dont les côtés ont une longueur a = 6,00 cm, est située à une distance d = 2,50 cm à la droite d'un fil infini dans lequel un courant variable circule vers le haut (voir la figure 11.24). La résistance de la bobine est de 0,550 Ω. L'équation du courant dans le fil est où t est exprimé en secondes et i, en ampères. a. Quelle est l'inductance mutuelle du système ? b. Quelle est la grandeur de la f.é.m. induite dans la bobine à t = 0,040 0 s ? c. Quel est le courant induit dans la bobine à t = 0,040 0 s ? d. Dans quel sens circule le courant induit dans la bobine à t = 0,040 0 s ?

Section 11.2 L'auto-induction Q6 Le tableau suivant présente les caractéristiques de cinq solénoïdes (le nombre de spires, l'aire de la section, la longueur et le courant dans le solénoïde). Classez les solénoïdes selon un ordre croissant de l'inductance. solénoïde spires aire longueur courant 1 N A i 2 N/2 A i 3 2N A/2 i 4 N/2 A/2 2i 5 N 2A 2i Q7 La bobine d'induction illustrée à la figure 11.25 est par- courue par un courant orienté vers la gauche. On mesure la différence de potentiel entre les points a et b au moyen d'un voltmètre. Indiquez si le courant augmente, diminue ou demeure constant dans les situations suivantes : a.

V_b > V_a ; b. V_b < V_a ; c. V_b = V_a. FIGURE 11.25 • Question 7 Q8 La figure 11.26 illustre le courant en fonction FIGURE 11.24 • Problème 3 P4 Une bobine de N spires, ayant un rayon r bobine, est pla- du temps qui circule dans une bobine d'induction. Classez les temps indiqués selon un ordre croissant de la f.é.m. induite (de la plus négative à la plus positive) dans la bobine d'induction. cée autour d'un très long solénoïde de n spires par mètre, ayant un rayon r_{sol} < r bobine. a.

Calculez l'inductance mutuelle du système. b. Calculez la grandeur de la f.é.m. induite dans le solénoïde si le taux de variation du courant dans la bobine est di/dt. P5 Une bobine de 100 spires, ayant un rayon de 10,0 cm, est placée autour d'un très long solénoïde de 1 200 spires/m, ayant un rayon de 5,00 cm. FIGURE 11.26 • Question 8 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES 401 E9 Une bobine d'induction de 140 mH est parcourue R16 Une bobine toroïdale à base rectangulaire de N spires, par un courant initial de 4,50 A qui change à un taux de 7,50 A/s. Quelle est la grandeur de la f.é.m. induite aux bornes de la bobine d'induction ?

a un rayon intérieur a, un rayon extérieur b et une hau teur h, comme le montre la vue en coupe de la figure 11.28. Un courant i circule dans la bobine. E10 Une bobine d'induction de 0,060 0 H est parcourue a. Quel est le module du champ magnétique à l'intérieur de la bobine, à une distance r du centre ? par un courant i qui circule vers la droite. Le courant varie en fonction du temps : b. Quel est le flux magnétique à travers une spire ? c. Démontrez que son inductance est où le temps est exprimé en secondes et le courant, en ampères.

a. Quelle est la grandeur de la f.é.m. induite aux bornes de la bobine à t = 0,00 s ? b. Quelle borne de la bobine a un potentiel plus élevé ? E11 Un solénoïde, dont la section transversale a une aire de 3,75 mm 2, possède 8,00 spires par millimètre. Quelle est l'inductance par unité de longueur de ce solénoïde ? E12 Un solénoïde de 150 spires, ayant un diamètre de 18,0 mm et une longueur de 35,0 cm, est parcouru par un courant de 10,0 A. FIGURE 11.28 • Problème récapitulatif 16 a. Quel est le flux magnétique à travers une spire du solénoïde ? Section 11.3 Le circuit RL b. Quelle est l'inductance de ce solénoïde ? E13 Un solénoïde de 250 spires, ayant une longueur de 37,2 cm et un diamètre de 17,3 cm, est parcouru par un cou rant de 26,0 A. Si le courant chute à zéro en 3,50 ms, quelle est la grandeur de la f.é.m. moyenne d'autoinduction ? Q17 Dans les trois circuits de la figure 11.29, on ferme l'interrupteur à t = 0. Classez par ordre croissant le courant qui circule dans la pile à t = 0. P14 Deux bobines d'induction, ayant des inductances L_1 et L_2, sont branchées ensemble dans un circuit. Elles sont sépa rées par une grande distance, de telle sorte que leur induc tance mutuelle est négligeable. Les deux bobines peuvent être remplacées par une bobine équivalente, ayant une inductance Léq. Calculez l'inductance équivalente si les bobines sont branchées : a. en série ; FIGURE 11.29 • Question 17 Q18 Dans les trois circuits de la figure 11.30, on ferme l'interrupteur à t = 0. Classez par ordre croissant le courant qui circule dans la pile lorsque t → ∞. b. en parallèle. P15 On branche deux bobines en série, comme le montre la figure 11.27. Les bobines ont une inductance respective L_1 et L_2, et le système a une inductance mutuelle M. Quelle est l'induc tance équivalente de ce système si les bobines sont branchées : a. comme dans la figure 11.27a. FIGURE 11.30 • Question 18 b. comme dans la figure 11.27b. Q19 La figure 11.31 (voir la page suivante) illustre le cou rant en fonction du temps pour quatre circuits RL dans les quels une pile est branchée en série à une résistance et une bobine d'induction et à un interrupteur. Dans les quatre circuits, la résistance R est la même.

On ferme l'interrup teur des quatre circuits à t = 0. Classez les circuits par ordre croissant selon : (a) (b) a. la constante de temps ; b.

l'inductance du circuit ; FIGURE 11.27 • Problème 15 c. la f.é.m. de la pile.

402 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES b. Calculez le courant qui circule dans la pile lorsque t → ∞. FIGURE 11.31 • Question 19 FIGURE 11.34 • Problèmes 23 et 24 E20 Le circuit RL de la figure 11.32 est constitué d'un inter- R24 Dans le circuit de la figure 11.34, R_1 = 50,0 Ω, rupteur, d'une source de f.é.m., d'une résistance de 47,0 Ω et d'une bobine de 75,0 mH. À t = 0, on place l'interrupteur à la position b, pour que la source de f.é.m. soit exclue du circuit et qu'un courant continue de circuler dans la bobine et dans la résistance. Après combien de temps le courant est-il égal à la moitié du courant initial ?

R_2 = 75,0 Ω, R_3 = 60,0 Ω, R_4 = 25,0 Ω, L = 82,0 mH et E = 24,0 V. On ferme l'interrupteur à t = 0. a. Calculez le courant qui circule dans chaque résistance à t = 0. b.

Calculez le courant qui circule dans chaque résistance lorsque t → ∞. c. Après un temps très long, on ouvre l'interrupteur. Quel est le courant dans chaque résistance tout juste après avoir ouvert l'interrupteur ? d. Quelle est la f.é.m. d'auto-induction de la bobine tout juste après avoir ouvert l'interrupteur ? FIGURE 11.32 • Exercice 20 R25 On fabrique un solénoïde en enroulant un fil de cuivre rupteur, une résistance de 132 Ω et une bobine d'induction de 65,4 mH. On ferme le circuit à t = 0. sur un cylindre de carton ayant un rayon de 5,00 cm. Le fil de cuivre a un diamètre de 1,024 mm et une longueur de 125 m. Supposez que le solénoïde est idéal, avec des spires jointives. a. Quelle est la constante de temps du circuit ? a. Quelle est la résistance du solénoïde ? b. À quel instant le courant est-il maximal ? b. Quelle est l'inductance du solénoïde ? c. Quel est le courant maximal du circuit ? d. Quelle est la puissance de la bobine à t = 2,00 ms ? On branche le solénoïde à une source de f.é.m. de 6,00 V dont la résistance interne est de 1,40 Ω. E22 Dans le circuit de la figure 11.33, E = 12,0 V, c. Quelle est la constante de temps du circuit ? R = 47,0 Ω et L = 0,200 H.

On ferme le circuit à t = 0. d. Quel est le courant après 1,00 ms ? a. Après combien de temps le courant est-il égal à 100 mA ?

P26 En utilisant la méthode décrite à la section 7.7, démon- b. Quelle est la différence de potentiel aux bornes de la bobine à t = 2,70 ms ? trez que la solution de l'équation différentielle 11.16 est E21 Une pile de 12,0 V est branchée en série avec un inter- c. Quelle est la puissance dissipée par la résistance à t = 3,50 ms ? P27 En utilisant la méthode décrite à la section 7.7, démon- trez que la solution de l'équation différentielle 11.12 est FIGURE 11.33 • Exercice 22 P23 Dans le circuit de la figure 11.34, R_1 = 150,0 Ω, R_2 = R_3 = R_4 = 75,0 Ω, L = 82,0 mH et E = 43,0 V. On ferme l'interrupteur à t = 0.

a. Calculez le courant qui circule dans la pile à t = 0.

Section 11.4 L'énergie emmagasinée dans une bobine d'induction Q28 Le tableau suivant montre l'inductance, le courant et la longueur de trois bobines dans des circuits différents. Classez par ordre croissant l'énergie emmagasinée dans les bobines. QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES bobine L i ▇ 1 L0 i0 ▇0 2 L 0/2 2i0 2▇0 3 2L 0 i0/2 ▇0 E29 Un circuit RL est constitué d'une pile de 30,0 V, d'une résistance de 120 Ω et d'une bobine. Quelle est l'inductance de la bobine si celle-ci emmagasine une énergie de 23,4 mJ lorsque le courant a atteint sa valeur maximale ? E30 Une bobine d'induction de 1,10 H est branchée en série à une pile de 50,0 V et à une résistance de 470 Ω. On ferme le circuit à t = 0. À t = 3,50 ms, déterminez : 403 R34 Un fil de cuivre a un diamètre de 1,50 mm et il est parcouru par un courant de 3,50 A. Quelle est la densité d'énergie électromagnétique à la surface du fil ? Section 11.5 Les oscillations dans un circuit LC E35 Un circuit LC est composé d'une bobine dont l'induc- tance est de 2,58 mH et d'un condensateur dont la capacité est de 330 μF. La différence de potentiel maximale aux bornes du condensateur est de 6,40 V. a. Quelle est la fréquence angulaire du circuit ? b. Quelle est la valeur maximale du courant ? E36 Dans un circuit LC, le condensateur a une capacité c. Quelle est la puissance dissipée dans la résistance ?

de 4,75 μF et une charge maximale de 26,3 μC. On ferme l'interrupteur lorsque la charge du condensateur est maximale.

La charge du condensateur est nulle pour la première fois 1,50 ms après la fermeture de l'interrupteur. d. Quelle est la puissance fournie par la pile ? a. Quelle est la période ? E31 Dans le circuit RL de la figure 11.35, E = 15,0 V, R b. Quelle est la valeur de l'inductance de la bobine du circuit ? a. le courant dans le circuit ; b. l'énergie emmagasinée dans la bobine. = 40,0 Ω et L = 0,600 H. L'interrupteur est à la position a pendant un temps très long lorsqu'à t = 0, on le place à la position b. a. Quelle est l'énergie initialement emmagasinée dans la bobine ? b. Après combien de temps l'énergie de la bobine a-t-elle chuté à la moitié de la valeur initiale ? c. À cet instant, quelle est la puissance fournie par la bobine ? c. Quelle est l'énergie maximale emmagasinée dans la bobine ? E37 Dans un circuit LC, une bobine d'induction de 5,60 H est reliée à deux condensateurs en série de 10,0 μF et de 24,0 μF. On ferme l'interrupteur à t = 0, lorsque la charge du condensateur est maximale. Le courant maximal dans le circuit est de 2,78 mA. a. Quelle est la fréquence angulaire des oscillations du circuit ? b.

Quelle est l'énergie magnétique emmagasinée dans la bobine d'induction à t = 3,50 ms ? c. Quelle est l'énergie électrique dans chaque condensateur à t = 3,50 ms ? FIGURE 11.35 • Exercice 31 P32 Un long solénoïde de 2 048 spires ayant une longueur de 50,3 cm et un rayon de 2,85 cm est branché en série à une pile de 12,0 V, une résistance de 38,0 Ω et un interrupteur. On ferme l'interrupteur à t = 0. d. Quelle est l'énergie mécanique du système ? Est- elle conservée ? P38 Une bobine d'induction de 55,0 mH est reliée a. Quelle est l'énergie magnétique dans le solénoïde à t = 1,00 ms ? en série avec un condensateur de 3,67 μF et un interrupteur. Le condensateur est complètement chargé lorsqu'on ferme l'interrupteur à t = 0. Le courant maximal est de 1,00 A. b. Quel est le module du champ magnétique dans le solénoïde à t = 1,00 ms ? a. Quel est le plus court temps nécessaire pour que le courant atteigne 65,0 % de sa valeur maximale ? c. Quelle est la densité d'énergie magnétique à t = 1,00 ms ? b. Trouvez une expression mathématique pour le taux auquel l'énergie magnétique est emmagasinée dans la bobine d'induction. R33 Un fil de cuivre, dont la résistivité est ρ, a un diamètre d. Un courant i, uniformément distribué, circule dans le fil. a. Quelle est la densité d'énergie magnétique à la surface du fil ? Section 11.6 Les oscillations amorties dans un circuit RLC b. Quelle est la densité d'énergie électrique à la surface du fil ? critique et lesquels sont en régime surcritique ? E39 Dans les circuits RLC suivants, lesquels sont en régime 404 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES circuit R (Ω) L (mH) C (mF) (i) 2,0 2,0 4,0 (ii) 2,0 4,0 4,0 (iii) 2,0 2,0 2,0 (iv) 2,0 4,0 2,0 (v) 3,0 2,0 2,0 (vi) 1,0 2,0 2,0 E40 Dans un circuit RLC, un condensateur de 56,0 μF, une bobine d'induction de 38,0 mH et une résistance de 2,30 Ω sont reliés en série avec un interrupteur comme à la figure 11.36. À t = 0, on ferme l'interrupteur. Le condensateur a une charge initiale de 42,5 μC. a. Quelle est la fréquence angulaire de l'oscillation amortie ? b.

Quelle charge possède l'armature supérieure du condensateur à t = 6,00 ms ? c. Quelle est l'amplitude de l'oscillation à t = 6,00 ms ? FIGURE 11.36 • Exercice 40 P41 Dans un circuit RLC, un condensateur a une capa- cité C et possède une charge initiale Q_m. La résistance est R, et la bobine d'induction a une inductance L. On ferme l'interrupteur à t = 0. Trouvez l'expression du courant en fonction de temps. SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 405 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 11.1 (iii) et (vi) EL est vers la gauche. Si le courant circule vers la droite, il doit augmenter pour que la f.é.m. induite, opposée à la variation, soit vers la gauche. Si le courant circule vers la gauche, il doit diminuer pour que la f.é.m. induite, qui s'oppose à la variation, soit vers la gauche. 11.2 a. le circuit (ii) Plus la constante de temps est élevée et plus le courant décroît lentement, car i = i_m e −t/τ . b. le circuit (ii) La constante de temps est τ = L/R. Étant donné que les circuits ont des résistances identiques, le circuit ayant une plus grande inductance a la constante de temps la plus élevée. 11.3 τ(i) < τ(iii) < τ(ii) La constante de temps est τ = L/R éq. Dans le circuit (iii), la résistance en parallèle avec la bobine d'induction n'a pas d'influence sur la constante de temps, car le courant qui passe à travers la bobine ne passe pas à travers cette résistance. 11.4 u_d < u_c < u_b < u_a La densité d'énergie magnétique est proportionnelle au carré du module du champ magnétique.

Le champ magnétique produit par un fil diminue lorsque la distance du fil augmente. 11.5 a. t = 2,5 ms Le courant et la charge sont indiqués dans les graphiques de la figure 11.18. Le courant est maximal à t = T/4 et minimal à t = 3T/4.

La charge est minimale à t = T/2. b. t = 7,5 ms c. t = 5,0 ms Chapitre 406 Les circuits à courant alternatif Buts du chapitre Ce chapitre porte sur les circuits alimentés au moyen d'une différence de potentiel sinusoïdale. Après l'étude de ce chapitre, vous serez en mesure : • de comprendre les notions d'amplitude et de déphasage ; • d'analyser un circuit RLC alimenté par un générateur ; • d'obtenir la condition de résonance d'un circuit ; • de calculer la puissance moyenne dans un circuit à courant alternatif ; • d'étudier le fonctionnement d'un transformateur. Préalables Ce chapitre porte sur la façon dont les dispositifs de circuit se comportent lorsqu'ils sont alimentés par une différence de potentiel sinusoïdale. Revoyez : • les condensateurs, abordés à la section 5.1 ; • la puissance dans les circuits, expliquée à la section 6.6 ; • les lois de Kirchhoff, présentées à la section 7.2 ; • la loi de Faraday, énoncée à la section 10.3 ; • l'induction mutuelle et l'auto-induction, étudiées aux sections 11.1 et 11.2. 407 Un transformateur permet de changer l'amplitude de la différence de potentiel sinusoïdale. 408 CHAPITRE 12 — Les circuits à courant alternatif Les compagnies d'électricité comme Hydro-Québec produisent de l'énergie électrique au moyen de générateurs. À l'aide d'un courant d'eau ou de vapeur sous pression, une bobine tourne dans un champ magnétique, ce qui induit une f.é.m. sinusoïdale. L'énergie électrique est ensuite transportée par des lignes à haute tension, jusqu'aux consommateurs. Les appareils électriques qu'on utilise tous les jours doivent fonctionner avec une différence de potentiel sinusoïdale ; ainsi, le courant produit varie continuellement dans le temps. C'est ce qu'on appelle un courant alternatif. Nous avons étudié les circuits à courant continu dans les chapitres 7 et 11, où nous avons analysé le comportement des résistances, des condensateurs et des bobines d'induction. Nous allons maintenant examiner le comportement de ces dispositifs lorsque la f.é.m. du circuit varie de façon sinusoïdale. Une méthode graphique, basée sur des vecteurs tournants, permettra d'effectuer les calculs qui font intervenir des fonctions sinusoïdales. L'utilisation d'un réseau électrique à courant alternatif présente des avantages lors du transport de l'énergie électrique. En effet, pour réduire les pertes d'énergie électrique par effet Joule, le courant doit être faible dans les conducteurs d'une ligne de transport. Nous verrons qu'il est possible de réduire le courant en augmentant en même temps la différence de potentiel, à l'aide d'un appareil appelé transformateur. La différence de potentiel est ensuite diminuée près du lieu de consommation, au moyen d'un autre transformateur, comme celui qui est présenté sur la photo en début de chapitre. Les circuits à courant alternatif font aussi partie intégrante des appareils de communication, comme les radios et les téléphones cellulaires. 12.1 Les circuits à courant alternatif À la section 10.6, nous avons vu que lorsqu'une bobine tourne à vitesse angulaire constante dans un champ magnétique uniforme, il y a une f.é.m. induite dans la bobine. Cette f.é.m. varie de façon sinusoïdale en fonction du temps : (12.1) FIGURE 12.1 Une f.é.m. sinusoïdale La figure 12.1 montre la f.é.m. en fonction du temps. La f.é.m. varie de +E_m (la valeur maximale) à $-E_m$. Le paramètre E_m est appelé l'amplitude de la f.é.m. Par définition, l'amplitude d'une quantité est toujours positive, et elle s'exprime à l'aide des mêmes unités que la quantité. Donc, E_m se mesure en volts, comme la f.é.m. Le paramètre ω est appelé la fréquence angulaire. Ce paramètre est relié à la fréquence f et à la période T du mouvement de rotation de la bobine dans le champ magnétique : (12.2) Dans le Système international, la fréquence angulaire se mesure en radians par seconde (rad/s). FIGURE 12.2 Un appareil est branché à un générateur. Prenons le circuit de la figure 12.2, avec un générateur branché à un appareil quelconque (qui peut contenir des résistances, des condensateurs et des bobines d'induction), ce qui constitue un circuit. On utilise le symbole pour 12.1 — Les circuits à courant alternatif représenter un générateur qui produit une f.é.m. sinusoïdale. La f.é.m. génère un courant i dans le circuit. Ce courant varie aussi de façon sinusoïdale. Selon une convention, on écrit le courant de la façon suivante : (12.3) Le courant varie avec la même fréquence angulaire ω que la f.é.m. L'amplitude du courant est i_m, c'est-à-dire que le courant varie de +i_m à $-i_m$ pendant un cycle. La constante f, qu'on appelle la constante de phase, représente le déphasage du courant par rapport à la f.é.m. En général, le courant et la f.é.m.

n'atteignent pas leurs valeurs maximales respectives en même temps (voir la figure 12.3). La constante de phase est mesurée en radians ; dans les circuits, Ainsi, • Lorsque f = 0, la f.é.m. et le courant sont en phase.

Le courant est maximal quand la f.é.m. est maximale (voir la figure 12.3a).

• Lorsque f > 0, le courant est en retard sur la f.é.m., c'est-à-dire que le courant atteint sa valeur maximale après que la f.é.m. a atteint sa valeur maximale (voir la figure 12.3b).

• Lorsque f < 0, le courant est en avance sur la f.é.m., c'est-à-dire que le courant atteint sa valeur maximale avant que la f.é.m. ait atteint sa valeur maximale (voir la figure 12.3c). REMARQUE Il est possible de transférer la constante de phase dans la définition de la f.é.m., de telle sorte que le courant n'a pas de constante de phase. Dans cette convention, la f.é.m. s'écrit E = E_m sin(ω t + f). On utilise un signe négatif dans l'argument du sinus de l'équation 12.3 pour que la constante de phase soit la même dans les deux conventions. (a) (b) FIGURE 12.3 La f.é.m. et le courant en fonction du temps : (a) le déphasage est nul ; (b) le déphasage est positif ; (c) le déphasage est négatif. La f.é.m. dépend du générateur, alors que le courant dépend des caractéristiques du circuit. La valeur de E_m et de la fréquence angulaire ω sont des propriétés du générateur. Dans les réseaux électriques d'Amérique du Nord, l'amplitude de la f.é.m. est d'environ 170 V et la fréquence, de 60,0 Hz. Ailleurs, la fréquence est habituellement de 50 Hz et l'amplitude de la f.é.m., d'environ 311 V. Ces valeurs sont différentes parce que les réseaux électriques se sont développés de façon indépendante en Europe et en Amérique du Nord. (c) 409 410 CHAPITRE 12 — Les circuits à courant alternatif L'amplitude du courant i_m et la constante de phase f dépendent du circuit, c'est-à-dire des caractéristiques des éléments du circuit. Nous allons voir dans les prochaines sections la façon de calculer i_m et f dans le cas de résistances, de condensateurs et de bobines d'induction. REMARQUE La constante de phase doit être exprimée en radians et la fréquence angulaire en rad/s lorsqu'on utilise les équations 12.1 et 12.3. Cependant, la constante de phase est exprimée de façon usuelle en degrés lorsqu'on veut seulement indiquer le déphasage. La représentation de Fresnel Pour analyser les circuits à courant alternatif, on va de nouveau utiliser les lois de Kirchhoff, qui demeurent valides pour les valeurs instantanées du courant et de la différence de potentiel. Par exemple, dans le cas de la loi des mailles, il faut additionner les différences de potentiel instantanées (c'est-à-dire pour un temps t fixe) des éléments d'une maille : Les valeurs instantanées sont données par des fonctions trigonométriques, qu'on doit additionner. Il est possible d'utiliser des identités trigonométriques pour simplifier les résultats. Dans le cas présent, on va plutôt employer une méthode graphique, qu'on appelle la représentation de Fresnel, en l'honneur du physicien français Augustin Fresnel (1788-1827). Cette méthode représente une fonc tion trigonométrique par un vecteur tournant, aussi appelé un vecteur de Fresnel ou phaseur *. FIGURE 12.4 La représentation de Fresnel pour une f.é.m. sinusoïdale Prenons d'abord la f.é.m. d'un générateur, donnée par E = E_m sin(ω t). On définit un vecteur dans un plan, qui tourne autour de l'origine en sens antihoraire, à une vitesse angulaire ω (voir la figure 12.4).

Le module du vecteur est proportionnel à l'amplitude E_m, et l'angle entre l'axe horizontal et le vecteur correspond à ω t. La valeur instantanée de la f.é.m. est obtenue en calculant la composante du vecteur le long de l'axe vertical. Supposons maintenant que le courant dans le circuit est i = i_m sin(ω t − f). Le vecteur de Fresnel représentant le courant tourne à la même vitesse angulaire. Le déphasage entre la f.é.m. et le courant est représenté par l'angle f entre la f.é.m. et le courant, comme le montre la figure 12.5. Dans cette figure, le vecteur représentant le courant est tracé à une échelle différente de celle du vecteur représentant la f.é.m., car ces deux quantités n'ont pas les mêmes unités. Le signe de f suit la convention habituelle lorsqu'on le trace du courant vers la f.é.m. : un angle en sens antihoraire est positif, et un angle en sens horaire est négatif. Pour additionner deux valeurs instantanées, on doit additionner les vecteurs de Fresnel correspondants. On réduit donc l'addition de fonctions trigonométriques à l'addition de vecteurs. * Cette méthode est basée sur l'utilisation des nombres complexes a + bi = reiθ, avec pour représenter une fonction trigonométrique. , 12.2 — Les résistances dans les circuits à courant alternatif (a) (b) (c) FIGURE 12.5 La représentation de Fresnel : (a) le courant est en phase avec la f.é.m. ; (b) le courant est en retard sur la f.é.m. ; (c) le courant est en avance sur la f.é.m. TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 12.1 Dans la représentation de Fresnel suivante, de quelle façon la valeur instantanée de la f.é.m.

change-t-elle ? (i) Elle reste constante. (ii) Elle augmente. (iii) Elle diminue. (iv) On ne peut pas le dire. 12.2 Les résistances dans les circuits à courant alternatif Dans le circuit de la figure 12.6, une résistance R est branchée à un générateur à courant alternatif, dont la f.é.m. est E = E_m sin(ω t). On veut obtenir la forme du courant qui circule dans la résistance, sous la forme i_R = i_{Rm} sin(ω t − f_R), c'està-dire qu'on veut obtenir l'amplitude du courant i_{Rm} et la constante de phase f_R. Selon la loi des mailles, on obtient : La différence de potentiel aux bornes de la résistance est égale à la f.é.m., car c'est le seul dispositif branché au générateur. Pour la même raison, ΔV R est en phase avec la f.é.m. On peut écrire la différence de potentiel aux bornes de la résistance de la façon suivante : (12.4) où ΔV Rm est l'amplitude de la différence de potentiel aux bornes de la résistance. Dans le cas d'une résistance, la différence de potentiel est proportionnelle au courant qui circule dans la résistance : FIGURE 12.6 Une résistance est branchée à un générateur. 411 412 CHAPITRE 12 — Les circuits à courant alternatif On obtient alors le courant : (12.5) En comparant cette équation à la formule générale du courant (i = i_m sin[ωt − f]), on obtient l'amplitude du courant et la constante de phase, entre le courant et la différence de potentiel pour une résistance : (12.6) (12.7) L'amplitude du courant est reliée par l'équation habituelle, la loi d'Ohm, comme nous l'avons vu à la section 6.27. De plus, le courant et la différence de potentiel aux bornes d'une résistance sont en phase. La figure 12.7 montre le courant et la différence de potentiel en fonction du temps, ainsi que la représentation de Fresnel pour la résistance. REMARQUE La relation ΔV = Ri s'applique pour les valeurs instantanées et pour les amplitudes. (a) (b) FIGURE 12.7 (a) Le courant et la différence de potentiel aux bornes d'une résistance dans un circuit à courant alternatif. (b) La représentation de Fresnel pour la résistance dans un circuit à courant alternatif.

TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 12.2 La représentation de Fresnel suivante montre les vecteurs tournants pour la différence de potentiel et le courant dans une résistance R. Que peut-on dire sur la valeur de la résistance ? (i) R > 1 Ω. (ii) R < 1 Ω. (iii) L'information est insuffisante pour déterminer la valeur. 12.2 — Les résistances dans les circuits à courant alternatif EXEMPLE 12.1 413 Deux résistances et un générateur On branche une résistance R_1 = 100 Ω et une résistance R_2 = 150 Ω à un générateur (E = E_m sin[ω t]) ; l'amplitude est de 12,0 V et la fréquence, de 60,0 Hz (voir la figure ci-contre). a. Quelle est l'amplitude de la différence de potentiel aux bornes de chaque résistance ? b. Quel est le courant dans le circuit à t = 20,0 ms ?

Les amplitudes de la différence de potentiel aux bornes des résistances sont SOLUTION Décortiquer le problème (réponse) (réponse) Les deux résistances sont en série, ce qui signifie que le courant est le même et que la résistance équiva lente est SOLUTION b. Identifier la clé Le courant dans le circuit est le courant dans la résis tance équivalente, donné par l'équation 12.5 : (i) SOLUTION a. Identifier la clé La clé est l'équation 12.6 pour chaque résistance : (vi) Résoudre le problème Nous obtenons (ii) (réponse) (iii) où l'amplitude du courant est calculée à partir de la résistance équivalente du circuit : (iv) Résoudre le problème Nous calculons d'abord l'amplitude du courant en remplaçant les valeurs dans l'équation (iv) : (v) Valider la réponse Dans la solution a., la somme des différences de potentiel donne bien la f.é.m., comme il se doit pour des résistances, car les différences de potentiel sont en phase. Dans la solution b., il faut faire attention aux unités : l'argument du sinus est en radians. La valeur instantanée est plus petite que l'amplitude, comme il se doit. 414 CHAPITRE 12 — Les circuits à courant alternatif 12.3 Les condensateurs dans les circuits à courant alternatif On veut maintenant analyser le comportement d'un condensateur lorsque celuici est soumis à une différence de potentiel sinusoïdale. Pour ce faire, on branche un condensateur, ayant une capacité C, à un générateur, dont la f.é.m. est E = E_m sin(ω t), comme le montre la figure 12.8. Selon la loi des mailles, FIGURE 12.8 Un condensateur est branché à un générateur. La différence de potentiel aux bornes du condensateur est la même que la f.é.m., car il est branché directement au générateur.

On peut écrire (12.8) où ΔVCm est l'amplitude de la différence de potentiel aux bornes du condensateur. Selon l'équation 5.1 de la page 164, la différence de potentiel aux bornes du condensateur est reliée à la charge sur les armatures : (12.9) De plus, le courant dans le circuit correspond au taux de variation de la charge sur les armatures du condensateur.

Selon l'équation 6.3 de la page 192, On remarque que le courant n'est pas proportionnel à la différence de potentiel aux bornes du condensateur, car le courant est donné par une fonction sinus, alors que la différence de potentiel l'est par une fonction cosinus.

On peut utiliser l'identité trigonométrique cos(θ) = sin(θ + π/2) pour exprimer le courant en fonction d'un sinus. Le courant s'écrit (12.10) La figure 12.9a montre le graphique du courant et de la différence de potentiel en fonction du temps. Dans le cas du condensateur, le courant et la différence de potentiel ne sont pas en phase, contrairement à la résistance où ces deux quantités sont en phase. En effet, le courant est maximal un quart de période avant le maximum de la différence de potentiel. Le courant est maximal lorsque le condensateur est déchargé. Quand ce dernier est complètement chargé, le courant est nul. Dans la figure 12.9b, on peut voir la représentation de Fresnel pour le condensateur. En résumé, Dans un condensateur, le courant est en avance de π/2 sur la différence de potentiel aux bornes du condensateur. 12.3 — Les condensateurs dans les circuits à courant alternatif (a) 415 (b) FIGURE 12.9 (a) Le courant et la différence de potentiel aux bornes du condensateur, en fonction du temps. (b) La représentation de Fresnel pour le condensateur. En comparant l'équation 12.10 à la forme générale du courant i = i_m sin(ω t−f), on obtient le déphasage du courant pour un condensateur : (12.11) La réactance capacitive Le courant dans le condensateur n'est pas proportionnel à la différence de potentiel. Cependant, l'amplitude du courant est proportionnelle à l'amplitude de la différence de potentiel. En effet, selon l'équation 12.10, on peut écrire (12.12) Cette expression ressemble à la loi d'Ohm. On définit la réactance capacitive : (12.13) Réactance capacitive L'amplitude du courant s'écrit alors (12.14) De la même façon que la résistance est une constante de proportionnalité entre la différence de potentiel et le courant dans une résistance, la réactance capacitive est la constante de proportionnalité entre l'amplitude de la différence de potentiel aux bornes d'un condensateur et l'amplitude du courant. Comme la résistance, la réactance se mesure en ohms (Ω). Contrairement à la résistance, la réactance capacitive dépend de la fréquence angulaire (voir le graphique de la figure 12.10). En effet, la réactance tend vers l'infini pour une fréquence nulle, ce qui implique que l'amplitude du courant est de plus en plus faible lorsque la fréquence s'approche de zéro. Ceci a du sens, car le condensateur bloque le courant dans un circuit à courant continu. À l'opposé, pour une fréquence très grande, le courant a une très grande amplitude. Dans cette dernière situation, le condensateur n'ayant pas le temps de se charger, il se comporte comme un simple fil. MISE EN GARDE La réactance capacitive est une constante de proportionnalité entre l'amplitude du courant et l'amplitude de la différence de potentiel. Il n'y a pas de relation de proportionnalité entre les valeurs instantanées du courant et de la différence de potentiel aux bornes d'un condensateur. FIGURE 12.10 La réactance capacitive en fonction de la fréquence angulaire 416 CHAPITRE 12 — Les circuits à courant alternatif TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 12.3 Un condensateur est relié à une f.é.m. alternative. Comment varie l'amplitude du courant dans le condensateur si on diminue la fréquence de la f.é.m.? EXEMPLE 12.2 Une fréquence choisie Un condensateur de 300 nF est soumis à une différence de potentiel sinusoïdale dont l'amplitude est de 3,00 V. Pour quelle fréquence l'amplitude du courant est-elle de 20,0 mA ? SOLUTION Décortiquer le problème Résoudre le problème Nous calculons d'abord la réactance du condensateur en isolant XC dans l'équation (i) : (iii) Nous calculons ensuite la fréquence à l'aide de l'équation (ii) : Identifier la clé La clé est l'équation 12.14, qui relie l'amplitude du courant et l'amplitude de la différence de potentiel aux bornes du condensateur : (i) où XC est la réactance capacitive : (ii) 12.4 (réponse) Valider la réponse L'ordre de grandeur semble correct. Remarquez que la réactance est utilisée comme une résistance dans la loi d'Ohm.

Il faut se rappeler que ceci est correct dans le cas des amplitudes et non dans celui des valeurs instantanées. Les bobines d'induction dans les circuits à courant alternatif On veut maintenant obtenir le comportement des bobines d'induction dans les circuits alimentés par une f.é.m.

sinusoïdale. La figure 12.11 montre une bobine d'induction, dont l'inductance est L, branchée à un générateur à courant alternatif dont la f.é.m. est E = E_m sin(ω t). FIGURE 12.11 Une bobine d'induction est branchée à un générateur. Selon la loi des mailles, on obtient La différence de potentiel de la bobine est la même que la f.é.m., car la bobine est branchée directement au générateur. Il est utile d'écrire la différence aux bornes de la bobine de la façon suivante : (12.15) 12.4 — Les bobines d'induction dans les circuits à courant alternatif La différence de potentiel aux bornes d'une bobine est reliée à la variation de courant qui y circule, car la bobine induit une f.é.m. lorsque le courant change : Pour trouver le courant, on doit inverser cette équation à l'aide d'une intégrale : REMARQUE Mathématiquement, on doit ajouter une constante d'intégration à la dernière équation. Cette constante représente un courant continu qui serait la conséquence d'un générateur ayant une f.é.m. continue.

Ici, la f.é.m.

est sinusoïdale, sans valeur constante. Pour cette raison, la constante d'intégration est simplement 0. Pour pouvoir comparer i = i_m sin(ω t − f) à la formule du courant, on utilise l'identité trigonométrique (−cos θ) = −sin(π/2 −θ) = sin(θ −π/2), présentée aussi à l'annexe E. Ceci permet d'écrire le courant de la façon suivante : (12.16) La figure 12.12a illustre le courant et la différence de potentiel aux bornes de la bobine.

La différence de potentiel est maximale lorsque le courant est nul. C'est dans cette situation que le taux de variation du courant (la pente de la courbe du courant) est le plus grand. La différence de potentiel atteint sa valeur maximale avant le courant. On peut donc dire, dans le cas d'une bobine d'induction : Le courant dans une bobine d'induction est en retard de π/2 par rapport à la différence de potentiel aux bornes de la bobine. (a) (b) FIGURE 12.12 Le courant et la différence de potentiel aux bornes de la bobine d'induction en fonction du temps. (b) La représentation de Fresnel pour une bobine d'induction. 417 418 CHAPITRE 12 — Les circuits à courant alternatif Le déphasage du courant dans une bobine est donc (12.17) La figure 12.12b illustre ce résultat dans la représentation de Fresnel. La réactance inductive Selon l'équation 12.16, l'amplitude du courant est proportionnelle à l'amplitude de la différence de potentiel aux bornes de la bobine : FIGURE 12.13 La réactance inductive en fonction de la fréquence angulaire (12.18) où la constante XL est la réactance inductive de la bobine : (12.19) Réactance inductive Comme le montre le graphique de la figure 12.13, la réactance inductive est proportionnelle à la fréquence angulaire. Lorsque ω est faible, le courant ne change pas rapidement, et la f.é.m. d'auto-induction de la bobine est faible. Le courant peut être assez intense. Par contre, lorsque ω est élevée, la bobine génère une f.é.m. d'auto-induction intense, qui s'oppose à la f.é.m. du générateur. Le courant dans la bobine doit alors être faible. EXEMPLE 12.3 L'effet de la fréquence Une bobine d'induction est branchée à un générateur (E_m = 3,50 V). Lorsque la fréquence est de 200 Hz, l'amplitude du courant dans la bobine est de 0,400 A. a. Quelle est l'inductance de la bobine ? b. Quelle est l'amplitude du courant dans la bobine si la fréquence est de 1 200 Hz ?

SOLUTION Décortiquer le problème La bobine est branchée directement au générateur, donc ΔV Lm = Em. (réponse) SOLUTION b. Identifier la clé La fréquence a changé, mais la différence de potentiel et l'inductance de la bobine n'ont pas changé.

Nous isolons iLm dans l'équation (i), puis nous remplaçons les valeurs relatives à la deuxième situation : SOLUTION a. Identifier la clé (réponse) La clé est l'équation 12.18 : Valider la réponse (i) Résoudre le problème Nous remplaçons les valeurs initiales : En multipliant la fréquence par un facteur 6, cela fait augmenter la réactance inductive d'un fac teur 6. L'amplitude du courant doit donc être 6 fois plus petite dans la deuxième situation, ce qui est bien le cas. 12.5 — Le circuit RLC en série TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 12.4 Une bobine d'induction est soumise à une différence de potentiel sinusoïdale, dont la fréquence est f. Comment varie l'amplitude du courant dans la bobine d'induction si on diminue la fréquence ? 12.5 Le circuit RLC en série Après avoir étudié de façon séparée le comportement des résistances, des condensateurs et des bobines d'induction soumis à des différences de potentiel sinusoïdales, on analyse maintenant un circuit composé de ces trois dispositifs, branchés en série avec un générateur, comme à la figure 12.14.

Le générateur a une f.é.m. qui varie de façon sinusoïdale : Comme les éléments sont branchés en série, le courant i est le même dans tout le circuit : FIGURE 12.14 Le circuit RLC en série On veut trouver l'amplitude du courant i_m et la constante de phase f, qui représente le déphasage du courant par rapport à la f.é.m., en fonction des caractéristiques du circuit.

La représentation de Fresnel Pour analyser le circuit RLC, on applique la loi des mailles. En commençant au point a du circuit de la figure 12.14, en sens horaire, on obtient (12.20) Dans cette équation, on doit additionner les valeurs instantanées, données par des fonctions trigonométriques. Plutôt que d'utiliser la méthode algébrique, on va plutôt recourir à la représentation de Fresnel. L'équation 12.20 est alors une somme vectorielle. • On trace le vecteur du courant, car c'est le même courant dans chaque élément. La longueur et l'orientation du vecteur sont choisies de façon arbitraire. • La différence de potentiel de chaque dispositif : pour la résistance, ΔV R est en phase avec le courant ; le vecteur ΔV R a la même orientation que le vecteur i. On trace ensuite ΔV L à π/2 rad en avance de i (car i est en retard dans le cas d'une bobine), et le vecteur ΔVC à π/2 rad est en retard sur i (car i est en avance pour un condensateur).

• On calcule la somme vectorielle pour trouver le vecteur E, selon l'équation 12.20. 419 420 CHAPITRE 12 — Les circuits à courant alternatif • On obtient un triangle rectangle, dont l'hypoténuse est E_m, l'amplitude de la f.é.m., et l'angle entre E et i représente la constante de phase f. Ici, on a supposé que ΔV L > ΔVC, ce qui produit un déphasage f > 0, et le courant est en retard sur la f.é.m. Dans le cas où ΔV L < ΔVC, la représentation de Fresnel montre que le déphasage est négatif (f < 0), car le courant est en avance sur la f.é.m. L'impédance du circuit L'amplitude de la f.é.m. correspond à la longueur de l'hypoténuse, dans la représentation de Fresnel : où chaque différence de potentiel peut être écrite en fonction de l'amplitude du courant et de la résistance ou de la réactance du dispositif. On peut isoler l'amplitude du courant : (12.21) Le dénominateur est appelé l'impédance du circuit : (12.22) Impédance L'impédance est mesurée en ohms (Ω). Comme la réactance, l'impédance permet de mettre en relation l'amplitude du courant et l'amplitude de la f.é.m., et ce, pour le circuit complet : (12.23) Amplitude du courant L'équation 12.23 permet d'écrire une équation qui a la même forme que la loi d'Ohm. EXEMPLE 12.4 Un circuit RLC en série On branche un générateur à courant alternatif (E_m = 170 V, f = 60,0 Hz) à un circuit RLC en série. La résistance est de 150 Ω, la bobine a une inductance de 0,240 H et le condensateur a une capacité de 10,0 μF. a. Quelle est l'impédance du circuit ? b. Quelle est l'amplitude du courant ? c. Quelle est l'amplitude de la différence de potentiel aux bornes de chaque dispositif ?

12.5 — Le circuit RLC en série SOLUTION Décortiquer le problème 421 Résoudre le problème Nous obtenons (réponse) SOLUTION c. Identifier la clé L'amplitude de la différence de potentiel aux bornes d'un dispositif est obtenue à partir de l'amplitude du courant et de la résistance, ou de la réactance : SOLUTION a. Identifier la clé (vi) (vii) La clé est l'équation 12.22 pour calculer l'impédance du circuit : (viii) (i) avec les réactances données respectivement par les équations 12.19 et 12.13 : Résoudre le problème Nous obtenons, à partir des résultats précédents : (réponse) (ii) (réponse) Résoudre le problème Nous calculons d'abord la réactance inductive et la réactance capacitive : REMARQUE (iii) (iv) L'impédance du circuit est donc (réponse) SOLUTION b. Identifier la clé Nous trouvons l'amplitude du courant dans le circuit à l'aide de l'équation 12.23 : (v) Nous obtenons La loi des mailles (voir l'équation 12.20) ne s'applique pas aux amplitudes, mais seulement aux valeurs instantanées, car les valeurs instantanées ne sont pas maximales en même temps.

Valider la réponse L'ordre de grandeur des valeurs obtenues semble correct. L'impédance du circuit est plus élevée que la résistance, car la bobine et le condensateur influencent la valeur de l'amplitude du courant. 422 CHAPITRE 12 — Les circuits à courant alternatif La constante de phase La représentation de Fresnel permet aussi de calculer la constante de phase. Selon le triangle rectangle, présenté de nouveau à la figure 12.15 : L'amplitude du courant se simplifie : (12.24) Constante de phase If y a trois possibilités : • Lorsque $X_L > X_C$, la constante de phase est positive, et le courant est en retard sur la f.é.m. (voir la figure 12.16a). On dit alors que le circuit est plutôt inductif. • Lorsque $X_L < X_C$, la constante de phase est négative, et le courant est en avance sur la f.é.m. (voir la figure 12.16b). On dit alors que le circuit est plutôt capacitif. FIGURE 12.15 Le triangle issu de la représentation de Fresnel • Lorsque $X_L = X_C$, la constante de phase est nulle, ce qui implique que le courant et la f.é.m. sont en phase (voir la figure 12.16c). On dit alors que le circuit est en résonance. Il est possible de comparer l'équation 12.24 aux résultats des sections précédentes. Si le circuit ne possède qu'une bobine d'induction, $X_C = R = 0$ et $\phi = \pi/2$, ce qui correspond à la plus grande valeur possible de la constante de phase. Si le circuit possède uniquement un condensateur, $X_L = R = 0$ et $\phi = -\pi/2$. Ceci est la plus petite valeur possible de la constante de phase. (a) (b) (c) FIGURE 12.16 La f.é.m. et le courant en fonction du temps : (a) $X_L > X_C$; (b) $X_L < X_C$; (c) $X_L = X_C$. EXEMPLE 12.5 Les valeurs instantanées Un circuit RLC est constitué d'une résistance de 78,0 Ω, d'une bobine ayant une inductance de 0,080 0 H et d'un condensateur ayant une capacité de 4,70 μF. On branche le circuit à un générateur dont l'amplitude est de 8,00 V et la fréquence, de 400 Hz. a. Quelle est l'amplitude du courant ? b. Quelle est la constante de phase ? c. Calculez la différence de potentiel aux bornes de chaque élément à t = 1,00 ms. 12.5 — Le circuit RLC en série 423 SOLUTION Décortiquer le problème 423 Résoudre le problème Nous obtenons (réponse) Valider la réponse La constante de phase doit être positive, car $X_L > X_C$. Le courant est donc en retard par rapport à la f.é.m. Nous calculons la fréquence angulaire, la réactance de la bobine et la réactance du condensateur : (i) (ii) (iii) SOLUTION c. Identifier la clé SOLUTION a. Illustrer la situation La figure 12.17 montre la représentation de Fresnel à un temps t = 1,00 ms, de telle sorte que ωt = 8000 rad/s × 0,001 0 s = 0,800π rad. Nous traçons le courant en retard d'un angle f sur la f.é.m. et ΔV R en phase avec le courant. De plus, ΔV L est en avance de π/2 par rapport au courant, alors que ΔVC est en retard de π/2 par rapport au courant. Nous calculons l'amplitude du courant à l'aide de l'équation 12.23 : (iv) où l'impédance du circuit est donnée par l'équation 12.22 : (v) (vi) (vii) FIGURE 12.17 La représentation de Fresnel à t = 1,00 ms Nous calculons d'abord la valeur de la f.é.m. à ce temps : SOLUTION b. Identifier la clé Résoudre le problème La différence de potentiel aux bornes du générateur est Nous calculons l'impédance du circuit : (viii) À l'aide de l'équation (v), nous obtenons l'amplitude du courant : (réponse) SOLUTION b. Identifier la clé La clé est l'équation 12.24, permettant d'obtenir la constante de phase : (vi) Pour la résistance, la différence de potentiel est obtenue par la loi d'Ohm : (viii) Dans le cas de la bobine, nous obtenons la différence de potentiel à partir de la réactance. De plus, le courant est en retard de π/2 sur la différence de potentiel de la bobine, donc la différence de potentiel aux bornes de la bobine est en avance de π/2 sur le courant, comme le montre la figure 12.17 : (ix) 424 CHAPITRE 12 — Les circuits à courant alternatif Pour le condensateur, la différence de potentiel est en retard de π/2 sur le courant, comme le montre la figure 12.17 : (réponse) (x) Résoudre le problème Nous insérons toutes les valeurs dans les équations (vii) à (x), où ωt = 0,800π : (réponse) (réponse) Valider la réponse La loi des mailles s'applique pour les valeurs instantanées : $\Delta V_R + \Delta V_L + \Delta V_C$ = 4,70 V, ce qui correspond bien à E à cet instant. La résonance Le courant dans le circuit RLC dépend de la résistance, de la bobine d'induction et du condensateur, mais aussi de la fréquence du générateur.

Lorsque la fréquence est faible, l'amplitude du courant l'est aussi, car la réactance du condensateur ($X_C = 1/(\omega C)$) est élevée. Lorsque la fréquence est élevée, l'amplitude du courant est de nouveau faible, car la réactance de la bobine d'induction ($X_L = \omega L$) devient importante. Il y a une fréquence intermédiaire où l'amplitude du courant est maximale. Ceci se produit à une fréquence angulaire ω_0, où la réactance inductive est égale à la réactance capacitive : (12.25) Fréquence angulaire de résonance Lorsque $\omega = \omega_0$, où dit que le circuit est résonant ou en résonance. L'amplitude du courant est maximale, car l'impédance du circuit est simplement égale à la résistance du circuit : (12.26) De plus, le courant est en phase avec la f.é.m. (f = 0). FIGURE 12.18 La courbe de résonance pour trois valeurs de résistance. Pour ce graphique, L = 0,100 H et C = 10 μC.

Les flèches représentent les largeurs à mi-hauteur.

La figure 12.18 montre le graphique de l'amplitude du courant en fonction de la fréquence angulaire, pour quelques valeurs de résistance. On remarque que plus la résistance est faible, plus le maximum de la courbe est grand et plus la courbe est étroite. Lorsque la fréquence angulaire est plus faible que la fréquence angulaire de résonance, la réactance capacitive est importante et le circuit est plutôt capacitif. Lorsque la fréquence angulaire est plus élevée que la fréquence angulaire de résonance, le circuit est plutôt inductif, car c'est la réactance inductive qui est plus importante. 12.5 — Le circuit RLC en série 425 Les circuits résonants sont utilisés dans les systèmes de communication, car ces circuits peuvent être sensibles à un intervalle étroit de fréquences, alors qu'ils sont insensibles aux autres fréquences. La résonance se produit aussi dans les circuits mécaniques, comme nous le verrons dans le tome 3. EXEMPLE 12.6 La radio AM Vous voulez fabriquer un récepteur de radio AM à l'aide d'un circuit dont l'inductance est de 55 μH et la résistance, de 30 Ω.

Le syntoniseur est un condensateur variable. Le signal radio a une fréquence de 730 kHz, et il produit une f.é.m. de 5,0 mV d'amplitude. a. Quelle est la valeur de la capacité du condensateur variable pour que le circuit soit résonant à 730 kHz ? b. Quelle est alors l'amplitude du courant dans le circuit ? c. Une autre onde radio, ayant une fréquence de 690 kHz, produit une f.é.m. dont l'amplitude est de 9,0 mV. Quelle est l'amplitude du courant causée par la deuxième onde radio ? SOLUTION Décortiquer le problème Résoudre le problème Nous obtenons (réponse) SOLUTION c. Identifier la clé Pour la deuxième onde radio, le circuit n'est pas en résonance. L'amplitude du courant se calcule à l'aide de l'équation 12.23 : (iii) SOLUTION a. Identifier la clé Pour être à la résonance, la fréquence angulaire de la f.é.m. doit être égale à la fréquence angulaire de résonance, donnée par l'équation 12.25 : (i) où Z est l'impédance du circuit : (iv) Résoudre le problème Résoudre le problème Nous calculons d'abord l'impédance du circuit, en remplaçant les valeurs dans l'équation (iv) : Nous obtenons (réponse) SOLUTION b. Identifier la clé Puisque le circuit est en résonance, l'amplitude du courant est simplement égale à l'amplitude de la f.é.m.

L'amplitude du courant se calcule alors à l'aide de la loi d'Ohm (voir l'équation 12.26) : (ii) (réponse) Valider la réponse Selon les résultats, la deuxième onde radio produit un courant 50 fois plus petit, même si l'amplitude de la f.é.m. est 2 fois plus élevée. 426 CHAPITRE 12 — Les circuits à courant alternatif TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 12.5 Dans un circuit RLC en série, ΔV Rm = 8 V, ΔVLm = 6 V et ΔV Lm = 4 V. a. Le courant est-il en avance, en retard ou en phase avec la f.é.m. ? b. La fréquence angulaire est-elle plus petite, égale ou plus grande que la fréquence angulaire de résonance ? 12.6 La puissance dans les circuits à courant alternatif Le générateur d'un circuit à courant alternatif est normalement utilisé pour fournir de l'énergie électrique à un appareil, comme un moteur ou un grille-pain. Dans cette section, on cherche à trouver la puissance moyenne fournie en fonction de l'amplitude du courant et du déphasage. Dans le cas des circuits à courant continu, nous avons vu que les résistances dissipent l'énergie électrique en énergie thermique, alors que les condensateurs et les bobines d'induction emmagasinent l'énergie. On obtient les mêmes résultats dans le cas des circuits à courant alternatif. Soit un circuit à courant alternatif quelconque, dans lequel il y a un générateur. La f.é.m. et le courant dans le générateur sont respectivement : La puissance instantanée fournie par le générateur est (12.27) Pour mieux comprendre cette relation, on utilise l'identité trigonométrique sin(α − β) = sin α cos β − cos α sin β pour le deuxième terme entre crochets : La figure 12.19 montre chacun des termes de cette équation en fonction du temps. Le premier terme, proportionnel à un carré, est toujours positif et il varie entre 0 et 1. Le deuxième terme est une fonction qui varie entre −0,5 et 0,5. Étant donné que la puissance instantanée varie rapidement, on calcule la puissance moyenne, évaluée sur une période. Comme le montre la figure 12.19a, la moyenne de $\sin^2$ est égale à 1/2, alors que la valeur moyenne de sin(x) cos(x) donne zéro. On obtient alors la puissance moyenne fournie par le générateur : (a) (b) FIGURE 12.19 (a) La fonction sin 2(ω t) pour une période. (b) La fonction sin(ω t) cos(ω t) pour une période. 12.6 — La puissance dans les circuits à courant alternatif 427 (12.28) De façon usuelle, on définit les valeurs efficaces de la f.é.m. et du courant en absorbant le facteur : (12.29) (12.30) Avec ces définitions, la puissance moyenne fournie par le générateur est (12.31) Remarquez que lorsqu'on utilise les valeurs efficaces, l'équation 12.31 a la même forme que l'équation 6.28 de la page 211 (P = Ei), qui donne la puissance dans les circuits à courant continu. Ceci justifie la définition des valeurs efficaces.

La valeur efficace d'une quantité est proportionnelle à l'amplitude de cette quantité. Pour cette raison, on a les mêmes équations reliant le courant efficace et la différence de potentiel efficace que dans le cas des amplitudes. Par exemple, dans un circuit RLC, on obtient (12.32) (12.33) (12.34) (12.35) où la différence de potentiel efficace est reliée à l'amplitude d'une différence de potentiel : (12.36) La grande majorité des voltmètres et des ampèremètres sont calibrés pour afficher les valeurs efficaces (sauf si on les utilise en mode « courant alternatif ». Par exemple, si vous mesurez la différence de potentiel d'une prise de courant en Amérique du Nord, le voltmètre indique environ 120 V, ce qui représente la valeur efficace de la différence de potentiel. L'amplitude de la différence de * Pour une fonction périodique ayant une période T, la valeur moyenne se calcule à l'aide d'une intégrale : Puissance moyenne 427 428 CHAPITRE 12 — Les circuits à courant alternatif potentiel est plus grande d'un facteur , c'est-à-dire que l'amplitude est égale à environ 170 V.

Pour mesurer directement l'amplitude d'une différence de potentiel, on utilise un oscilloscope. REMARQUE Les définitions des valeurs efficaces, données par les équations 12.29, 12.30 et 12.36, sont valides uniquement pour des fonctions sinusoïdales. Dans les autres cas, on doit calculer la puissance moyenne à l'aide d'une intégrale pour obtenir la relation entre la valeur efficace et l'amplitude. L'équation 12.31 montre que la puissance fournie par le générateur dépend du déphasage entre le courant et la f.é.m. Le facteur cos(f) est appelé le facteur de puissance. On remarque que le facteur de puissance ne dépend pas du signe de f, donc la puissance peut être la même si le courant est en retard ou en avance. Pour maximiser la puissance, il faut que le facteur de puissance soit égal à 1, c'est-à-dire que le circuit soit complètement résistif ou en résonance. Dans le cas de moteurs, qui contiennent des enroulements de fil, l'inductance est assez importante. On ajoute alors des condensateurs pour annuler la réactance inductive et maximiser la puissance utilisée par les moteurs.

Dans un circuit RLC, l'énergie fournie par le générateur est dissipée en énergie thermique dans la résistance. La puissance moyenne absorbée par un condensateur et par une bobine est nulle. Ces dispositifs emmagasinent de l'énergie durant une partie du cycle, et ils redonnent l'énergie au circuit dans l'autre partie du cycle. Il est possible d'écrire le facteur de puissance en fonction de l'impédance d'un circuit RLC en série. La figure 12.20 montre un triangle rectangle illustrant la relation tan f = (XL − XC)/R. L'hypoténuse de ce triangle est l'impédance, car R 2 + (XL − XC)2 = Z2. En recourant à la trigonométrie, on obtient FIGURE 12.20 (12.37) Le calcul du facteur de puissance Comme la puissance moyenne fournie par le générateur (qui est égale à la puissance moyenne dissipée par la résistance) peut s'écrire (12.38) TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 12.6 Dans un circuit RLC en série, le courant est en retard sur la f.é.m. On veut modifier le circuit pour que la puissance fournie au circuit soit maximale. a. Doit-on augmenter ou diminuer la fréquence angulaire de la f.é.m. ? b.

En gardant la fréquence angulaire constante, doit-on augmenter ou diminuer la capacité du condensateur ? 12.7 — Les transformateurs EXEMPLE 12.7 429 Un moteur électrique Un moteur, branché à une prise de courant (Eeff = 120 V et f = 60,0 Hz), a une puissance moyenne de 950 W. Le courant qui circule dans le moteur a une valeur efficace de 10,0 A. a. Quel est le facteur de puissance ? b. Quelle est la résistance du moteur ? c. Quelle est l'inductance du moteur, si aucun condensateur n'est branché dans le circuit ? SOLUTION Décortiquer le problème (réponse) SOLUTION c.

Décortiquer le problème Le moteur est un circuit inductif, car il comporte des bobines servant à produire un champ magnétique. Le facteur de puissance doit donc être positif. On peut le calculer à partir du facteur de puissance : SOLUTION a. Identifier la clé La clé pour trouver le facteur de puissance est l'équation 12.31 : (i) Identifier la clé La clé est l'équation 12.24, où XC = 0, car il n'y a pas de condensateur dans le circuit : Résoudre le problème (iii) Nous obtenons Résoudre le problème (réponse) L'inductance est SOLUTION b. Identifier la clé Nous pouvons calculer la résistance du moteur à partir de l'équation 12.38, en utilisant la relation entre le courant efficace et la puissance moyenne : (ii) Résoudre le problème Nous remplaçons les valeurs : (12.7 (réponse) Valider la réponse L'ordre de grandeur semble correct. Nous avons évalué ici seulement les valeurs absolues des grandeurs électriques, sans nous soucier de leurs phases, mais nous avions des moteurs, nous pouvions ajouter un condensateur en série, de telle sorte que le facteur de puissance soit égal à 1, donc que le circuit soit à la résonance. Les transformateurs Le transport de l'énergie électrique se fait par la conduction dans des lignes de transport. Étant donné que les lignes de transport ont une certaine résistance, il y a dissipation d'énergie électrique par effet Joule dans ces conducteurs.

Cette perte d'énergie électrique est proportionnelle au carré du courant ( ), comme nous l'avons vu à la section 12.6. Il faut donc utiliser un courant faible pour limiter les pertes d'énergie dans le transport. Dans ce cas, on doit augmenter la différence de potentiel pour pouvoir transporter une puissance élevée. 430 CHAPITRE 12 — Les circuits à courant alternatif Au Québec, la majeure partie des centrales électriques sont très éloignées des centres urbains. Pour cette raison, Hydro-Québec utilise des lignes à très haute tension, jusqu'à 765 kV, afin de réduire le courant et donc les pertes d'énergie électrique dans les lignes de transport. Il serait très dangereux d'utiliser une si grande différence de potentiel dans les maisons.

La différence de potentiel est diminuée à une valeur efficace de 240 V et de 120 V. Les transformateurs sont des appareils qui permettent d'augmenter ou de diminuer la différence de potentiel. La f.é.m. produite dans une centrale électrique a une valeur efficace d'environ 10 kV. Un transformateur élévateur est utilisé pour augmenter la différence de potentiel à plusieurs centaines de kilovolts (jusqu'à 735 kV ou 765 kV pour les très longues lignes). Au bout de la ligne, un poste de distribution diminue la différence de potentiel à quelques milliers de volts, au moyen de transformateurs abaisseurs. Un dernier transformateur abaisseur, comme celui qui est illustré en début de chapitre, est employé près des résidences, pour réduire la différence de potentiel à 240 V. FIGURE 12.21 Un petit transformateur, utilisé pour faire fonctionner les appareils nord-américains en Europe Les transformateurs sont aussi utilisés dans plusieurs appareils électroniques pour réduire la différence de potentiel à quelques volts. De même, si vous voulez utiliser un appareil conçu pour le marché nord-américain dans un voyage en Europe, vous aurez besoin d'un transformateur comme celui qui est présenté à la figure 12.21. En effet, les prises de courant en Europe génèrent une différence de potentiel ayant une valeur efficace de 230 V, alors que les appareils nord-américains nécessitent une valeur efficace de 120 V. Un transformateur simple est constitué de deux bobines enroulées autour d'un noyau de fer, comme le montre la figure 12.22 (la figure 12.23 illustre le symbole utilisé dans les schémas). On branche une source de f.é.m. alternative à la première bobine, qu'on appelle le primaire et qui possède Np spires. La deuxième bobine, qu'on appelle le secondaire et qui possède Ns spires, est branchée à un circuit. Pour simplifier l'analyse, on suppose que le circuit du secondaire est simplement une résistance. Le noyau de fer est présent pour maximiser le nombre de lignes de champ magnétique qui circulent dans les spires du secondaire. La source de f.é.m. du côté primaire produit un courant qui varie de façon sinusoïdale.

Ce courant produit un champ magnétique variable dans le noyau de fer. Les lignes de champ magnétique génèrent un flux magnétique dans les spires de la bobine secondaire. La variation du flux magnétique induit une f.é.m.

sinusoïdale dans le secondaire. FIGURE 12.22 Le schéma d'un transformateur simple FIGURE 12.23 Le symbole représentant un transformateur 12.7 — Les transformateurs Pour un transformateur idéal, toutes les lignes de champ magnétique créées par la bobine primaire produisent un flux magnétique à travers les spires de la bobine secondaire. Alors, le flux magnétique à travers une spire de la bobine primaire est égal au flux magnétique à travers une spire de la bobine secondaire : Selon la loi de Faraday (voir l'équation 10.5), Comme le flux est le même, on obtient (12.39) Lorsque Ns > Np, l'amplitude de la f.é.m. du côté secondaire est plus élevée. Le transformateur est un transformateur élévateur. Lorsque Ns < Np, l'amplitude de la f.é.m. du côté secondaire est plus faible, et le transformateur est un transformateur abaisseur. La f.é.m.

induite du côté secondaire génère un courant is dans la résistance R. Dans le cas d'un transformateur idéal, toute l'énergie électrique du primaire est fournie au secondaire. On obtient alors En insérant l'équation 12.39, on a (12.40) Le fait d'augmenter l'amplitude de la f.é.m. réduit l'amplitude du courant. Il y a un courant is qui circule du côté du secondaire, étant donné qu'une résistance est branchée au secondaire. Ce courant agit sur le circuit primaire. En insérant l'équation 12.39 et 12.40, Le courant dans le primaire est proportionnel à la différence de potentiel du primaire à la f.é.m. dans ce circuit primaire. La constante de proportionnalité correspond à l'inverse d'une résistance équivalente : (12.41) Cette résistance équivalente correspond à la résistance totale du circuit primaire, causée par la résistance du circuit secondaire. 431 432 CHAPITRE 12 — Les circuits à courant alternatif Ce résultat donne lieu à une nouvelle application pour le transformateur. Afin qu'un générateur transmette un maximum de puissance à un appareil, il faut que l'impédance interne du générateur soit égale à l'impédance de l'appareil. En branchant un transformateur entre le générateur et l'appareil, on peut adapter l'impédance, de telle sorte que la puissance fournie sera maximale si l'impédance équivalente du circuit primaire est égale à l'impédance interne du générateur. Par exemple, dans un système de son, l'impédance interne d'un amplificateur est de l'ordre du kilohm et celle d'un haut-parleur, de quelques ohms. Un transformateur, avec le bon nombre de spires, est alors branché entre les deux éléments pour qu'un maximum de la puissance audio soit transmis aux haut-parleurs. EXEMPLE 12.8 Un transformateur élévateur Un transformateur possède 80,0 spires du côté primaire et 600 spires du côté secondaire. On applique une différence de potentiel efficace de 20,0 V du côté primaire. Le secondaire est branché à un circuit RLC ayant un facteur de puissance égal à 1,00 et dont la résistance est de 2,00 kΩ. a. Déterminez le courant efficace qui circule dans la résistance du circuit secondaire. b. Déterminez le courant efficace dans le circuit primaire. Nous insérons ensuite les résultats dans l'équation (ii) : SOLUTION Décortiquer le problème (réponse) SOLUTION b.

Identifier la clé La clé est l'équation 12.40 : SOLUTION a. Identifier les clés (i) La première clé est l'équation 12.39 permettant de calculer la f.é.m. du côté secondaire : (i) Résoudre le problème Nous remplaçons la réponse au problème a. dans l'équation (iii) : La seconde clé est la loi d'Ohm, car le circuit secondaire est résistant, avec cos f = 1 : (ii) Résoudre le problème (réponse) Nous calculons d'abord la f.é.m.

du circuit secondaire : (iii) (réponse) Valider la réponse Un transformateur élévateur augmente la différence de potentiel en diminuant le courant. C'est bien ce que nous obtenons : le courant du circuit secondaire est plus faible que le courant du circuit primaire. 12.8 — Les circuits redresseurs 12.8 433 Les circuits redresseurs Plusieurs appareils électroniques, comme les ordinateurs, ont besoin d'une différence de potentiel continue pour fonctionner. Si on veut les brancher à une prise de courant alternatif, on a besoin d'un bloc d'alimentation (voir la figure 12.24), qui diminue la différence de potentiel à quelques dizaines de volts et qui la transforme en une différence de potentiel continue. Le bloc d'alimentation comprend un transformateur abaisseur (pour réduire la différence de potentiel) et un circuit redresseur, qui produit une différence de potentiel continue. Dans le circuit illustré à la figure 12.25a, une résistance R est branchée à une source de f.é.m. sinusoïdale. Un transformateur abaisseur est utilisé pour diminuer la différence de potentiel. L'élément essentiel d'un circuit redresseur est la diode, dont le symbole est . À la section 6.5 nous avons examiné la diode, un dispositif qui laisse passer le courant dans un sens (le sens indiqué par la flèche du symbole), alors qu'il bloque complètement le courant dans le sens opposé. Les diodes sont habituellement fabriquées à partir d'un semiconducteur, comme le silicium. La figure 12.25b montre la différence de potentiel aux bornes de la résistance en fonction du temps.

La diode ne laissant passer le courant que dans un sens, la différence de potentiel n'est plus négative. Par contre, elle est loin d'être constante. (a) (b) FIGURE 12.25 (a) Un bloc d'alimentation, avec un transformateur et une diode. (b) La différence de potentiel aux bornes de la résistance en fonction du temps. Pour réduire la variation de la différence de potentiel, on ajoute un condensateur en parallèle avec la résistance, comme dans le circuit de la figure 12.26a (voir la page suivante). Lorsque la résistance est branchée au circuit, le condensateur se charge.

Lorsque le courant qui circule dans la diode diminue, le condensateur FIGURE 12.24 Le bloc d'alimentation d'un ordinateur portable comprend un circuit redresseur. 434 CHAPITRE 12 — Les circuits à courant alternatif se décharge à travers la résistance, avec une constante de temps τ = RC. En choisissant bien la capacité du condensateur, on obtient une constante de temps suffisamment longue pour que la différence de potentiel varie très peu, comme le montre la figure 12.26b. (a) (b) FIGURE 12.26 (a) Un bloc d'alimentation, avec un transformateur, une diode et un condensateur. (b) La différence de potentiel aux bornes de la résistance en fonction du temps.

Le circuit redresseur illustré demeure très simple. Il est possible d'ajouter d'autres composantes pour que la variation de la différence de potentiel aux bornes de la résistance soit très faible. Il est important de remarquer que le circuit redresseur est conçu pour une résistance particulière. RÉSUMÉ 435 RÉSUMÉ Dans ce chapitre, nous avons étudié les circuits alimentés par une f.é.m. sinusoïdale. LES DÉFINITIONS • Un courant alternatif est produit par une f.é.m. qui varie de façon sinusoïdale en fonction du temps : où Em est l'amplitude. • L'oscillation se produit à une fréquence angulaire ω = 2π f. LES RÉSULTATS • Les éléments d'un circuit à courant alternatif élément X f (rad) résistance − 0 bobine ωL π/2 • Le courant dans le circuit est constant. La constante de phase indique le déphasage du courant par rapport à la f.é.m. : − f = 0 : le courant et la f.é.m. sont en phase ; − f > 0 : le courant est en retard ; − f < 0 : le courant est en avance. • Les valeurs efficaces sont proportionnelles aux amplitudes. Dans le cas d'une f.é.m. sinusoïdale, LES APPLICATIONS Dans un circuit RLC en série, l'amplitude du courant est proportionnelle à l'amplitude de la f.é.m. : • La puissance moyenne fournie par le générateur est • La puissance moyenne absorbée par la bobine ou le condensateur est nulle. • Un transformateur permet de changer l'amplitude de la f.é.m. et l'amplitude du courant. Il possède un enroulement de Np spires du côté primaire et de Ns spires du côté secondaire. Pour un transformateur idéal, où Z est l'impédance du circuit. La constante de phase se calcule ainsi : Lorsque le circuit secondaire est branché à une résistance R, il y a une résistance équivalente du côté primaire : • La fréquence angulaire de résonance est 436 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES • Exercices simples • P problèmes •• R problèmes solution disponible récapitulatifs • Section 12.1 Les circuits à courant alternatif Q1 Une source de f.é.m. alternative est branchée à un appareil, ce qui forme un circuit. Déterminez le déphasage entre le courant et la f.é.m. pour les différents graphiques suivants. a. solution disponible Qu'arrive-t-il à l'amplitude du courant si on augmente la fréquence angulaire de la f.é.m. ? FIGURE 12.28 sont bran- chés à un générateur dont l'amplitude est Em. Les résistances sont identiques. Classez les circuits selon un ordre croissant de l'amplitude du courant qui circule dans le générateur. b. (i) c. d. (ii) Q2 Tracez la représentation de Fresnel pour les situations suivantes. (iii) a. E = 12 V sin(60t) et i = 0,32 A sin (60t − π/6) ; b. E = 63,5 V sin(30t) et i = 8,40 A sin (30t + π/3). FIGURE 12.28 • Question 5 E3 Un oscilloscope peut afficher le signal d'un générateur E6 Une source à courant alternatif possède une f.é.m. don- sinusoïdal. Le graphique de la figure 12.27 représente la f.é.m.

en fonction du temps. L'échelle horizontale est de 5,0 ms/div et l'échelle verticale, de 10 V/div. (Une division correspond à un carré sur l'écran.) née par E = 12,0 V sin (150t). On branche la source à une résistance de 68,0 Ω. a.

Déterminez la fréquence. b. Quelle est l'amplitude de la f.é.m. ? c. Écrivez l'équation de la f.é.m. en fonction du temps. a. Quelle est l'amplitude du courant ? b. Quelle est la fréquence du courant ? c. Quel est le courant à t = 10,0 ms ? d. Quelle est la différence de potentiel aux bornes de la résistance lorsque le courant est maximal ? R7 Un générateur à courant alternatif possède une f.é.m. donnée par E = 15,6 V sin (378t). On branche le circuit illustré à la figure 12.29, où R1 = 133,0 Ω, R2 = 95,7 Ω et R3 = 63,4 Ω.

Quelle est l'amplitude du courant qui circule dans chacune des résistances ? FIGURE 12.27 • Exercice 3 Section 12.2 Les résistances dans les circuits à courant alternatif Q4 On branche une résistance R à un générateur à cou- rant alternatif dont l'amplitude Em est fixe. FIGURE 12.29 • Problème récapitulatif 7 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES Section 12.3 Les condensateurs dans les circuits à courant alternatif Q8 Les trois circuits illustrés à la figure 12.30 sont bran- chés à un générateur ayant une amplitude Em et une fréquence angulaire ω. Classez les circuits selon un ordre croissant de l'amplitude du courant dans le générateur. 437 R13 Le circuit de la figure 12.31 est constitué d'une source E et de trois condensateurs en parallèle dont les capacités sont C1 = 236 nF, C 3 = 524 nF, et la capacité C 2 est inconnue.

Le générateur a une amplitude de 15,0 V, et sa fréquence est de 120 Hz. L'amplitude du courant circulant dans le générateur est de 10,0 mA. a. Quelle est la capacité C 2 ? b. Quelle est la charge emmagasinée dans le condensateur C 2 à t = 26,7 ms ? c. Quel est le courant qui circule dans le condensateur C 2 à t = 26,7 ms ? (i) (ii) FIGURE 12.31 • Problème 13 R14 Le circuit de la figure 12.32 est composé d'une source (iii) FIGURE 12.30 • Question 8 Q9 Un circuit est composé d'un générateur à courant alter- natif, ayant une amplitude Em et une fréquence f0, branché à un condensateur ayant une capacité C.

On double l'amplitude de la f.é.m., et on change sa fréquence à la valeur f. Quel est le rapport f/f0 si l'amplitude du courant n'a pas changé ? à courant alternatif dont l'amplitude est de 12,0 V, et de quatre condensateurs. Les capacités des condensateurs sont C1 = 20,4 μF, C2 = 3,12 μF, C 3 = 4,50 μF et C4 = 2,34 μF. Le courant circulant dans la source a une amplitude de 20,5 mA. a. Quelle est la fréquence angulaire de la f.é.m. ? b. Quelle est la fréquence du courant qui circule dans le circuit ? c. Q10 Un circuit est composé d'un générateur, de fréquence f, branché à un condensateur ayant une capacité C. On ajoute un condensateur identique en série avec le premier. Par quel facteur la réactance capacitive change-t-elle ? E11 Un condensateur de 2,50 μF est branché à un généra- teur à courant alternatif ayant une amplitude de 7,40 V et une fréquence de 3,00 kHz. FIGURE 12.32 • Problème récapitulatif 14 a. Quelle est la réactance capacitive ? Section 12.4 Les bobines d'induction dans les circuits à courant alternatif b. Quelle est l'amplitude du courant ? Q15 Une bobine d'induction est branchée à un générateur c. Quel est le déphasage entre le courant et la f.é.m. ? à courant alternatif, ayant une amplitude Em et une fréquence f0. On change l'amplitude et on double la fréquence, sans que l'amplitude du courant change. Quel est le rapport Em /E0m ? E12 Une source à courant alternatif possède une f.é.m. donnée par E = 37,5 V sin (280t). On branche la source à un condensateur de 1,80 μF. a. Quelle est la réactance capacitive ? b. Quelle est l'amplitude du courant ? E16 Une bobine d'induction de 26,0 mH est branchée à un générateur ayant une amplitude de 30,0 V. c. Quel est le courant à t = 72,4 ms ? a. Quelle est l'amplitude du courant si la fréquence est de 1,80 kHz ? d. Quelle est la f.é.m. de la source lorsque le courant est maximal ? b. Quelle est l'amplitude du courant si la fréquence est de 50,0 mA ? 438 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES E17 Une source à courant alternatif possède une f.é.m.

(iii) L'inductance du circuit est augmentée. donnée par E = 1,70 V sin(120πt).

On branche la source à une bobine d'induction de 56,3 mH. (iv) L'inductance du circuit est diminuée. a. Quelle est la réactance inductive ? b. Quelle est l'amplitude du courant ? c.

Quel est le courant à t = 32,0 ms ? d. Quelle est la f.é.m. de la source lorsque le courant est maximal ? (v) La fréquence de la f.é.m. est augmentée. (vi) La fréquence de la f.é.m. est diminuée. (vii) La résistance du circuit est augmentée. (viii) La résistance du circuit est diminuée. E18 Un solénoïde de 2 000 spires, dont la section trans- versale est de 36,00 cm2 et dont la longueur est de 72,40 cm, est branché à un générateur à courant alternatif. Le générateur a une fréquence de 68,00 Hz, et son amplitude est de 4,500 V. a.

Quelle est l'inductance du solénoïde ? FIGURE 12.34 • Question 21 b. Quelle est la réactance inductive ? c. Quelle est l'amplitude du courant dans le circuit ? d.

Quel est le courant à t = 10,00 ms ? R19 Une bobine d'induction, dont l'inductance est de 58,3 mH, est branchée à un générateur à courant alternatif dont l'amplitude est de 12,0 V et la fréquence angulaire de 650 rad/s. a. Quel est le courant généré dans le circuit à t = 60,0 ms ? b. Quelle est la différence de potentiel aux bornes de la bo bine à cet instant ? Q22 La figure 12.35 montre la représentation de Fresnel pour un circuit RLC en série alimenté par un générateur à courant alternatif. a. Le courant est-il en avance ou en retard par rapport à la f.é.m. ? b.

Le circuit est-il plutôt inductif, plutôt capacitif ou résonant ? c. Pour mesurer l'amplitude de la différence de potentiel aux bornes de la bobine d'induction et la différence de potentiel. Quelle amplitude est la plus importante ? Section 12.5 Le circuit RLC en série Q20 Dans un circuit RLC en série, on mesure la diffé- rence de potentiel aux bornes de chacun des dispositifs en fonction de la fréquence du générateur. Identifiez chacun des dispositifs. FIGURE 12.35 • Question 22 E23 Un circuit RLC en série a une résistance de 1,20 kHz. Il est constitué d'un condensateur ayant une capacité C, d'une bobine ayant une inductance de 0,013 H et d'une résistance de 26 Ω.

Quelle est la valeur de la capacité du condensateur ? E24 Un circuit RLC en série a une résistance de 45,0 Ω, FIGURE 12.33 • Question 20 Q21 La figure 12.34 montre le courant et la f.é.m. d'un générateur dans un circuit RLC en série. Parmi les possibilités suivantes, lesquelles permettent d'obtenir un circuit en résonance ? (i) La capacité du condensateur est augmentée. (ii) La capacité du condensateur est diminuée. une bobine d'induction de 0,150 H et un condensateur de 22,0 μF. Le circuit est branché à un générateur ayant une amplitude de 170 V. La fréquence du générateur est telle que le courant est en phase avec la f.é.m. a. Quelle est la fréquence ?

b. Quelle est l'amplitude du courant ? c. Quelle est l'amplitude de la différence de potentiel aux bornes de chaque dispositif ? QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES E25 Dans un circuit RLC, une résistance de 328 Ω, une bobine d'induction de 256 mH et un condensateur de 9,47 μF sont branchés à un générateur ayant une fréquence de 120 Hz. L'amplitude du courant dans le circuit est de 36,2 mA. 439 a. lorsque la fréquence du générateur est plus faible que la fréquence b. lorsque la fréquence du générateur est plus élevée. a. Quelle est l'impédance du circuit ? b. Quelle est la constante de phase ? c.

Le circuit est-il inductif, capacitif ou résonant ? d. Quelle est l'amplitude de la différence de potentiel du générateur ?

P26 Les bobines réelles possèdent une certaine résistance, en plus de leur inductance, car elles sont faites d'un enroulement de fil. Un circuit RLC possède une bobine réelle, ayant une résistance de 15,0 Ω et une inductance de 45,0 mH, un condensateur ayant une capacité de 20,0 μF, et une résistance de 40,0 Ω. Dans le circuit, dont l'amplitude est de 5,00 V et la fréquence, de 120 Hz. a.

Quelle est l'amplitude du courant ? b. Quelle est l'amplitude de la différence de potentiel aux bornes de la bobine réelle ? P27 Un circuit RLC est composé d'une résistance de 25,0 Ω, d'une bobine d'induction de 320 mH et d'un condensateur de 60,0 μF. Pour quelle fréquence, le courant est-il en retard de π/8 rad par rapport à la f.é.m. ? P28 Dans un circuit RLC en série, le générateur a une amplitude de 170 V et une fréquence de 60,0 Hz. La résistance du circuit est de 120 Ω, la capacité est de 25,0 μF et l'inductance est de 40,0 mH. Lorsque la f.é.m. atteint sa valeur maximale : a. Quelle est la valeur instantanée du courant dans le circuit ? b. Calculez la différence de potentiel aux bornes de chaque dispositif. c.

Vérifiez que E = ΔV R + ΔV L + ΔVC.

P29 On branche un circuit RLC en série à une source ayant une amplitude de 15,0 V et une fréquence de 1,50 kHz. Le courant dans le circuit a une amplitude de 37,5 mA, et il est en retard de 0,250 rad. a. Quelle est l'impédance du circuit ? b. Quelle est la différence de potentiel aux bornes de la résistance ? R2 = 50,0 Ω, une capacité C = 15,0 μF et une inductance L = 0,400 H.

Il est branché à un générateur ayant une fréquence qui peut être modifiée. a. Quelle est la fréquence angulaire de résonance ? b. À quelles fréquences angulaires (ω1 et ω2), l'amplitude du courant est-elle égale à la moitié de l'amplitude maximale du courant ? c. Calculez la largeur à mi-hauteur relative Δω/ω 0 = (ω 2 −ω 1)/ω 0 de la courbe de résonance du circuit. Section 12.6 La puissance dans les circuits à courant alternatif E32 Un oscilloscope mesure un signal sinusoïdal dont la différence de potentiel a une amplitude de 15,15 V et une période de 0,050 s. Le facteur de puissance est de 0,542, et l'amplitude du courant est de 62,8 mA. Quelle est la puissance moyenne fournie au circuit ? E33 Un circuit RLC en série possède une résistance de 78,0 Ω, une inductance L = 40,0 mH et une capacité C.

Il est branché à un générateur ayant une valeur efficace de 40,0 V et une fréquence de 60,0 Hz. a.

Quelle est la valeur de la capacité pour que la puissance moyenne dissipée soit maximale ? b. Quel est alors le facteur de puissance ? c. Quelle est alors la puissance dissipée dans la résistance ? E34 Un appareil est branché à un générateur qui fournit une différence de potentiel efficace de 120 V avec une fréquence de 60,0 Hz. L'appareil a une résistance de 35,0 Ω, une réactance inductive de 25,0 Ω et aucune réactance capacitive. a. Quelle est l'impédance de l'appareil ? b.

Quelle est la constante de phase ? c. Quelle est la valeur efficace du courant dans le circuit ? d. Quelle est la puissance moyenne utilisée par l'appareil ? 440 QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES E35 Dans un circuit RLC, une source alternative fonctionne avec une différence de potentiel efficace de 120 V à une fréquence de 60,0 Hz. La résistance dans le circuit est de 36,4 Ω et la constante de phase, de π/4 rad. a. Quelle est l'impédance du circuit ? b. Quelle est la puissance moyenne fournie par la source ? E36 Un rhéostat permet de varier la résistance d'un appareil. Dans un circuit, un générateur a une f.é.m. efficace de 120 V et une fréquence de 60,0 Hz. Il est branché à une ampoule ayant une résistance R et une bobine d'induction ayant une inductance L variable, servant de rhéostat (voir la figure 12.37). Lorsque l'inductance de la bobine est nulle, l'ampoule dissipe une puissance moyenne de 100 W. On veut diminuer cette puissance moyenne à 10,0 W lorsque l'inductance de la bobine est maximale. montre la figure 12.38. La f.é.m. et le courant en fonction du temps sont a. Quelle est la résistance de l'ampoule ? b. Quelle est l'inductance maximale de la bobine ? c. Le courant est-il en avance ou en retard sur la f.é.m. ? c.

Le circuit possède-t-il un condensateur ? Si oui, quelle est sa capacité ? d. Le circuit est-il inductif, capacitif ou résonant ? e. Quelle est la résistance de l'ampoule ? b. Quelle est l'inductance maximale de la bobine ?

FIGURE 12.38 • Problème 39 Section 12.7 Les transformateurs Q40 Une ligne de transmission a une longueur ... trois FIGURE 12.37 • Exercice 36 P37 Un moteur électrique est branché à un générateur ayant une différence de potentiel efficace de 120 V et une fréquence de 60,0 Hz. Le courant circulant dans le circuit a une valeur efficace de 11,0 A, et le facteur de puissance est de 0,815. La réactance capacitive du moteur est nulle. a. Quelle est la puissance moyenne du moteur ? b. Quelle est l'impédance du moteur ? c. Quelle est l'inductance du moteur ? d.

On ajoute un condensateur en série avec le moteur. Quelle est la valeur de la capacité nécessaire ? c. Quelle est alors la puissance moyenne du moteur ? P38 Dans un circuit RLC en série, R = 180 Ω, L = 36,2 mH et C = 22,0 μF. La différence de potentiel du générateur est donnée par E = 15,8 V sin(500t), où t est exprimé en secondes. a. Quelle est l'impédance du circuit ? b. Quelle est l'équation du courant circulant dans le circuit ? c. Quelle est la puissance moyenne du circuit ? P39 Un générateur est branché à un circuit dont les com- posantes sont inconnues (une « boîte noire »), comme le fois plus grande qu'une deuxième ligne de transmission. La première ligne de transmission fonctionne avec une différence de potentiel E1 eff deux fois plus grande que la deuxième ligne.

Les deux lignes sont faites d'aluminium, et elles ont le même diamètre. Elles sont alimentées à la même puissance. a. Quel est le rapport R1 /R2 entre les résistances des deux lignes ?

b.

Quel est le rapport i1,eff /i2,eff entre les valeurs efficaces du courant dans chacune des lignes ? c. Quel est le rapport PR 1 /PR 2 entre les puissances dissipées dans les lignes de transmission ? E41 Un appareil électronique utilise un transformateur idéal branché à une prise de courant alternatif ayant une f.é.m. efficace de 120 V. L'appareil a besoin d'une f.é.m. efficace de 6,00 V et d'un courant efficace de 300 mA. Le facteur de puissance est égal à 1,00. a. Quel est le rapport Np /Ns ? c. Quelle est la valeur efficace du courant dans le primaire ? E42 Un amplificateur d'un système de son a une résistance interne de 1,15 kΩ.

Il produit une f.é.m. alternative qui alimente un haut-parleur dont la résistance est de 8,0 Ω. Pour que le maximum de puissance soit fourni au haut-parleur, QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES on doit utiliser un transformateur entre l'amplificateur et le haut-parleur, de telle sorte que la résistance équivalente au haut-parleur pour l'amplificateur soit égale à sa résistance interne. Quel est le rapport du nombre de spires Np/Ns nécessaire ? E43 Un générateur ayant une f.é.m. efficace de 120 V est branché à un transformateur idéal. Celui-ci possède 60,0 spires du côté primaire et 2 500 spires du côté secondaire. Le secondaire est branché à une résistance de 27,0 kΩ. a. Quelle est la f.é.m. efficace dans le circuit secondaire ? b. Quelle est la valeur efficace du courant dans le circuit secondaire ? c. Quelle est la puissance moyenne fournie au circuit primaire ? à

potentiel efficace de 240 V. Quelle est la valeur minimale du taux de dissipation d'énergie thermique de la ligne de transmission ? P45 Dans le circuit de la figure 12.39, une f.é.m. ayant une valeur efficace de 120 V est branchée à un transformateur idéal et à une résistance R1 = 60,0 Ω.

Le primaire a 300 spires et le secondaire, 50,0 spires. Le secondaire est branché à une résistance R 2 = 12,0 Ω. a. Quelle est la valeur efficace du courant dans le primaire ? b. Quelle est la valeur efficace de la différence de potentiel aux bornes de la résistance R1 ? c. Quelle est la valeur efficace de la différence de potentiel aux bornes de la résistance R2 ? P44 Un transformateur abaisseur idéal est utilisé pour diminuer la différence de potentiel d'une ligne de transmission par un facteur 5,00, dans le but d'alimenter un édifice. La résistance totale de la ligne de transmission est de 1,60 Ω. Le transformateur fournit à l'édifice une puissance moyenne de 73,8 kW, avec une différence de 441 FIGURE 12.39 • Problème 45 442 SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION 12.1 (ii) Le vecteur tournant est en rotation en sens antihoraire. La constante de phase est égale à l'amplitude de la f.é.m. multiplié par le sinus de l'angle. (ii) Le courant (i) correspond à la composante verticale du vecteur, avant rapporté de la figure 12.2. (iii) Le courant et la différence de potentiel aux bornes d'un condensateur sont deux quantités différentes. Lorsqu'on les trace dans le même diagramme, on utilise des échelles différentes. Les échelles reliant la longueur des vecteurs et l'amplitude de chaque quantité sont manquantes. On ne peut pas relier les amplitudes de la différence de potentiel et du courant pour trouver la résistance. 12.3 (Cm diminue. La réactance capacitive est $X_C = 1/(2\pi fC)$. En diminuant la fréquence, cela augmente la réactance capacitive. Selon l'équation 12.14, l'amplitude du courant diminue. 12.4 im augmente. La réactance inductive est $X_L = \omega L = 2\pi fL$. En diminuant la fréquence, cela fait diminuer la réactance inductive. Selon l'équation 12.18, l'amplitude du courant augmente. 12.5 a. i est en avance. Avec ΔV Lm = ΔVL et ΔVCm = ΔVCm, on a $X_L < X_C$; le courant est en avance sur la f.é.m. b. ω < ω0 12.6 a. ω doit diminuer. b. C doit diminuer. La réactance capacitive est plus importante à basse fréquence, la réactance inductive est plus importante à haute fréquence. Lorsque le circuit est plus faible que la fréquence de résonance, pour laquelle $X_L = X_C$. Nous pouvons utiliser l'équation 12.24, on obtient une petite constante de phase est plus faible que ω_0 si $X_L > X_C$ et $\omega > \omega_0$. Pour que la puissance soit maximale, il faut que la fréquence de résonance soit 0, donc un déphasage nul. Avec f > 0, $X_L > X_C$. Donc, ω soit diminuer et $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Avec ω constante, on obtient une puissance maximale lorsque f = 0, c'est-à-dire que ω = ω0. Ceci est possible si on diminue C. Annexe A 443 Annexe A Le système international d'unités (SI) Les unités ont été adoptées lors de la Conférence générale des poids et mesures, qui se tient à Sèvres. Les unités fondamentales du système international sont définies comme suit. Elles sont publiées par le Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres. Vous pouvez consulter le site Internet du Bureau international des poids et mesures pour plus de détails. Les unités de base Nom Unité Symbole Définition temps, durée seconde s La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133. (1968) longueur mètre m Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde. (1983) masse kilogramme kg Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme. (1889) courant électrique ampère A L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2 × 10−7 newton par mètre de longueur. (1948) température thermodynamique kelvin K Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau. (1968) quantité de matière mole mol La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12. (1971) intensité lumineuse candela cd La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540 × 1012 hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian. (1979) 444 Annexe A Quelques unités dérivées Grandeur Unité angle plan Symbole Équivalence Unité de base rad m/m 1 radian 2 aire mètre carré volume mètre cube m3 fréquence hertz masse linéique kilogramme par mètre m2 m3 Hz masse volumique kilogramme par mètre cube vitesse mètre par seconde s−1 s−1 kg/m kg/m 3 kg/m3 m/s m/s 2 m/s m/s2 accélération mètre par seconde carrée force newton N énergie, travail, chaleur joule J N·m kg · m2 /s2 puissance watt W J/s kg · m2 /s3 quantité de mouvement kilogramme mètre par seconde vitesse angulaire radian par seconde kg · m/s kg · m/s rad/s 1/s 2 accélération angulaire radian par seconde carrée rad/s 1/s2 moment d'inertie kilogramme mètre carré kg · m2 kg · m2 moment de force, couple newton mètre N·m kg · m2 /s2 moment cinétique, spin kilogramme mètre carré par seconde kg · m2 /s kg · m2 /s pression pascal Pa N/m2 kg/(m · s2) charge électrique coulomb C A·s A·s charge linéique coulomb par mètre C/m 2 A · s/m2 A · s/m3 charge surfacique coulomb par mètre carré C/m charge volumique coulomb par mètre cube C/m3 potentiel électrique, force électromotrice volt champ électrique volt par mètre V/m V J/C V/m N/C kg · m/(A · s3) F C/V A2 · s4 /(kg · m2) A/m A/m2 densité de courant ampère par mètre carré résistance électrique ohm Ω V/A kg · m2 /(A2 · s3) conductance électrique siemens S A/V A2 · s3/(kg · m2) champ magnétique tesla T N/(A · m) kg/(A · s2) flux magnétique weber Wb T · m2 kg · m2 /(A · s2) inductance henry H V · s/A kg · m2 /(A2 · s2) éclairement énergétique watt par mètre carré W/m2 kg/s3 −1 s−1 s activité d'un radionucléide becquerel Bq dose absorbée gray Gy J/kg m2 /s2 équivalent de dose sievert Sv J/kg m2 /s2 Grandeur Unité Symbole Valeur degré ° 1° = (π/180) rad minute ′ 1′ = (1/60)° seconde ″ 1″ = (1/60)′ tonne t 1 t = 1 000 kg Annexe A 445 Les préfixes du SI Facteur 3 Nom Symbole Facteur −3 10 kilo k 10 mega M 106 giga 9 10 téra 12 10 péta 15 10 exa 18 10 zetta 21 10 yotta 24 10 G T P E Z Y Nom Symbole milli m 10 déca da micro μ 102 hecto h nano n 10 −1 déci d pico p 10−2 centi cent f 10 −15 femto a 10 −18 atto z 10 −21 zepto y 10 −24 yocto Les unités autres que celles du SI Il y a d'autres unités en usage avec le SI Grandeur pression longueur distance section efficace volume logarithme d'un rapport Unité bar millimètre de mercure ångström mille marin hectare barn litre neper bel Symbole Conversion bar mmHg Å M 1 bar = 100 kPa 1 mmHg ≈ 133,322 Pa 1 Å = 0,1 nm = 100 pm 1 M = 1 852 m 1 ha = 100 m2 = 104 m2 b L ou l Np B ... 1 b = 100 fm2 = 10−28 m2 1 L = 1 dm3 = 10−3 m3 1 Np = 1 dB = 1 Les règles d'écriture • Les symboles des unités sont imprimés en caractères romains (droits), quelle que soit la police employée dans le texte où ils figurent. En général, les symboles des unités sont écrits en minuscules, mais, si le nom de l'unité dérive d'un nom propre, la première lettre du symbole est une majuscule. Le symbole du litre constitue une exception. • Lorsqu'on utilise un préfixe, celui-ci fait partie de l'unité, et on le place devant le symbole de l'unité, sans espace. Par exemple, mm pour millimètre. Lorsqu'on utilise un préfixe, le préfixe et le symbole de l'unité forment un nouveau symbole. Un préfixe n'est jamais utilisé seul, et on n'utilise jamais de préfixe composé. • Les symboles d'unités sont des entités mathématiques et non des abréviations.

Ils ne doivent donc pas être suivis d'un point, sauf s'ils se trouvent à la fin d'une phrase. Ils restent invariables au pluriel, et il ne faut pas mélanger les symboles et les noms des unités dans une même expression, puisque les noms ne sont pas des entités mathématiques. Dans l'expression V = 2 V, V représente le potentiel électrique et V indique des volts. m pour mètre N pour newton Pa pour pascal L pour litre 5 nm et non 5 mμm 50 cm et non 50 cms.

4 km et non 4 kms • Les règles classiques de multiplication ou de division algébriques s'appliquent pour former les produits et quotients de symboles d'unités. La multiplication doit être indiquée par une espace ou un point à mi-hauteur centré (·), pour éviter que certains préfixes soient interprétés à tort comme des symboles d'unités. La division est indiquée par une ligne horizontale, une barre oblique (/) ou des exposants négatifs. 45 N · m ou 45 N m, mais pas 45 Nm ms pour milliseconde m · s pour mètre seconde 23 m/s ou 23 · m · s−1 • Lorsque l'on combine plusieurs symboles d'unités, on doit prendre soin d'éviter toute ambiguïté, par exemple en utilisant des crochets ou des parenthèses, ou des exposants négatifs. Il ne faut pas utiliser plus d'une barre oblique dans une expression donnée s'il n'y a pas de parenthèses pour lever toute ambiguïté. m · kg/(s3 · A), mais pas m · kg/s3/A m · kg/s3 · A • La valeur d'une grandeur s'exprime comme le produit d'un nombre par une unité ; le nombre qui multiplie l'unité est la valeur numérique de la grandeur exprimée au moyen de cette unité. La valeur numérique d'une grandeur dépend du choix de l'unité. Ainsi, la valeur d'une grandeur particulière est indépendante du choix de l'unité, mais la valeur numérique est différente selon l'unité choisie.

10 m/s et 36 km/h représentent la même vitesse. • Les symboles des grandeurs sont en général formés d'une seule lettre en italique, mais ils peuvent être précisés par des informations complémentaires en indice, en exposant ou entre parenthèses. 446 Annexe B Annexe B Les constantes fondamentales Les constantes présentées ici sont les valeurs recommandées en 2010 par le Committee on Data for Science and Technology (CODATA). Visitez le site Internet du CODATA. Les nombres entre parenthèses sont l'incertitude sur les derniers chiffres.

Par exemple, 6,673 84(80) × 10−11 N · m2 / kg2 = (6,673 84 ± 0,000 80) × 10−11 N · m2 / kg2.

Nom vitesse de la lumière dans le vide constante magnétique constante électrique, 1/(c2μ0) constante gravitationnelle constante de Planck hc en eV · nm constante de Planck réduite, h/(2π) en MeV · fm charge élémentaire constante de structure fine, e2 /(4π ε0) inverse magnéton de Bohr, e/(2me) en eV/T magnéton nucléaire, e /(2mp) en eV/T constante de Rydberg, α2me c/(2h) hc en eV rayon de Bohr, α/(4πR∞) masse de l'électron en u énergie au repos masse du proton en u énergie au repos masse de l'atome d'hydrogène masse du neutron en u énergie au repos masse du deutéron en u énergie au repos masse de la particule alpha (He) masse du muon énergie au repos nombre d'Avogadro constante des gaz parfaits constante de Boltzmann, R/NA constante de Stefan-Boltzmann constante de Wien unité de masse atomique en MeV/c2 électronvolt Symbole c μ0 ε 0 G h hc e α a0 R me mp mH mn md mα mμ NA R k σ b u eV Valeur Approchée 3,00 × 108 m/s 4π × 10−7 N / A2 8,85 × 10−12 C2 /(N · m2) 6,67 × 10−11 N · m2 / kg2 6,63 × 10−34 J · s 1 240 eV · nm 1,05 × 10−34 J · s 197 MeV · fm 1,60 × 10−19 C 1/137 1,10 × 107 m−1 13,6 eV 5,29 × 10−11 m 9,11 × 10−31 kg ... Valeur recommandée 299 792 458 m/s 4π × 10−7 = 12,566 370 614 ... × 10−7 N / A2 8,854 187 817... × 10−12 C2 /(N · m2) 6,673 84(80) × 10−11 N · m2 / kg2 6,626 069 57(29) × 10−34 J · s 1 239,841 930(18) eV · nm 1,054 571 726(47) × 10−34 J · s 197,326 971 8(44) MeV · fm 1,602 176 565(35) × 10−19 C 1/137,035 999 074(44) 5,788 381 066(38) × 10−5 eV/T 3,152 451 260 5(22) × 10−8 eV/T 1,097 373 156 853 9(55) × 107 m−1 13,605 692 53(30) eV 5,291 772 109 2(17) × 10−11 m Unités m/s N/A2 F/m N · m2 / kg2 J·s eV · nm J·s MeV · fm C 137,0 927,4 × 10−26 5,788 × 10−5 5,05 × 10−27 3,152 × 10−8 ... 1,097 × 107 13,6 5,29 × 10−11 ... 9,109 × 10−31 kg 0,511 MeV/c2 1,673 × 10−27 kg ... 938,3 MeV/c2 ... 1,675 × 10−27 kg 939,6 MeV/c2 ... 3,344 × 10−27 kg ... 6,645 × 10−27 kg ... 1,88 × 10−28 kg 105,7 MeV/c2 6,02 × 1023 mol−1 8,31 J/(mol · K) 1,38 × 10−23 J/K 5,67 × 10−8 W/(m2 · K4) 2,90 × 10−3 m · K 1,66 × 10−27 kg 931,5 MeV/c2 1,60 × 10−19 J ... Annexe C Les données astronomiques Système solaire Soleil Mercure Vénus Terre Lune Mars Jupiter Saturne Uranus Neptune ... TABLEAU C.1 Les valeurs astronomiques ... Annexe D Les valeurs caractéristiques de certains matériaux ... Annexe E Annexe E Les formules mathématiques Les symboles mathématiques = égal à ≈ approximativement égal à ≠ différent de ∝ proportionnel à > plus grand que < plus petit que ≥ plus grand ou égal à ≤ plus petit ou égal à ± plus ou moins ∑ somme de ... La géométrie Cercle de rayon r, circonférence = 2πr, aire = πr2 ... Sphère de rayon r, aire = 4πr2, volume = (4/3)πr3 ... L'équation du second degré ax2 + bx + c = 0 a comme solution : ... L'arc de cercle s = rθ (θ en radians) Annexe E 451 Le théorème de Pythagore (E.14) (E.15) sin(−θ) = −sin θ ... Les triangles ... Les exposants et les logarithmes ... Les développements en série et les approximations Les identités trigonométriques sin(−θ) = −sin θ (E.1) sin(90° − θ) = cos θ (E.2) sin(180° − θ) = sin θ (E.3) cos(−θ) = cos θ (E.4) cos(90°

− θ) = sin θ (E.5) tan(−θ) = −tan θ (E.6) tan(θ + 180°) = tan θ (E.7) sin 2 θ + cos2 θ = 1 (E.8) 2 sec θ − tan θ = 1 2 L'exponentielle (E.9) 2 cosec θ − cotan θ = 1 (E.10) sin(2θ) = 2 sin θ cos θ (E.11) 2 Le binôme 2 cos(2θ) = cos θ − sin θ (E.12) (E.13) Le logarithme 452 Annexe E Les dérivées Les fonctions trigonométriques (θ en rad) Dans les équations suivantes, a et n représentent des constantes, alors que u et v représentent des fonctions quelconques de x. (E.23) (E.24) L'approximation des petits angles (E.25) Cette approximation est valable pour | θ | ≤ 5,0°. (E.26) Les produits de vecteurs (E.27) Le produit scalaire (E.28) (E.29) (E.30) (E.31) (E.32) Le produit vectoriel (E.33) (E.34) (E.35) (E.36) × × × (E.37) (E.38) Le vecteur est perpendiculaire aux vecteurs sens est donné par la règle de la main droite. et . Son (E.39) L'alphabet grec Alpha A Êta H Bêta B Thêta Gamma , Nu N Tau Xi Ξ Upsilon T Iota I Omicron O Phi Delta D Kappa K Pi Π , Khi Epsilon E Lambda Λ Rhô P , Psi Y Zêta Z Mu M Sigma Σ , Oméga , Φ f, ψ Annexe E 453 Les intégrales Une constante arbitraire doit être ajoutée à chaque inté grale indéfinie. Les arguments des fonctions trigonomé triques doivent être exprimés en rad. Les lettres a, b et n représentent des constantes, alors que les lettres u et v représentent des fonctions quelconques de x. (E.59) (E.60) (E.61) (E.40) (E.62) (E.41) (E.63) (E.42) (E.64) (E.43) (E.65) (E.44) (E.66) (E.45) (E.67) (E.46) (E.68) (E.47) (E.69) (E.48) (E.70) (E.49) (E.71) (E.50) (E.72) (E.51) (E.73) (E.52) (E.74) (E.53) (E.75) (E.54) (E.76) (E.55) (E.77) (E.56) (E.78) (E.57) (E.58) Annexe F 454 Annexe F Les propriétés des éléments Le tableau suivant donne le numéro atomique (Z), la masse molaire (M) et la masse volumique (ρ) à 20 °C. Consulter le site WebElements pour plus de détails. Symbole Z M (g/mol) ρ (g/cm3) Actinium Ac 89 [227] 10,070 Erbium Er 68 167,26 9,066 Aluminium Al 13 26,982 2,700 Étain Sn 50 118,71 7,310 Américium Am 95 [243] 13,670 Europium Eu 63 151,96 5,244 Antimoine Sb 51 121,76 6,697 Fer Fe 26 55,845 7,874 Argent Ag 47 107,87 10,490 Fermium Fm 100 [257] Argon Ar 18 39,948 Flerovium Fl 114 [289] Arsenic As 33 74,922 Fluor F 9 18,998 Astate At 85 [210] Francium Fr 87 [223] Azote N 7 14,007 Gadolinium Gd 64 157,25 7,901 Baryum Ba 56 137,33 3,510 Gallium Ga 31 69,723 5,904 Berkélium Bk 97 [247] 14,780 Germanium Ge 32 72,61 5,323 Béryllium Be 4 9,0122 1,848 Hafnium Hf 72 178,49 13,310 Bismuth Bi 83 208,98 9,780 Hassium Hs 108 [270] Bohrium Bh 107 [272] Hélium He 2 4,0026 Bore B 5 10,811 Holmium Ho 67 164,93 Brome Br 35 79,904 Hydrogène H 1 1,0079 Cadmium Cd 48 112,41 8,650 Indium In 49 114,82 7,310 Calcium Ca 20 40,078 1,550 Iode I 53 126,90 4,940 Californium Cf 98 [251] 15,100 Iridium Ir 77 192,22 22,650 Carbone C 6 12,011 2,267 Krypton Kr 36 83,80 Cérium Ce 58 140,12 6,689 Lanthane La 57 138,91 Césium Cs 55 132,91 1,879 Lawrencium Lr 103 [262] Chlore Cl 17 35,453 Lithium Li 3 6,941 Chrome Cr 24 51,996 7,140 Livermorium Lv 116 [293] Cobalt Co 27 58,933 8,900 Lutécium Lu 71 174,97 9,841 Copernicium Cn 112 [285] Magnésium Mg 12 24,305 1,738 Cuivre Cu 29 63,546 8,920 Manganèse Mn 25 54,938 7,470 Curium Cm 96 [247] 13,510 Meitnerium Mt 109 [276] Darmstadtium Ds 110 [281] Mendélévium Md 101 [258] Dubnium Db 105 [268] Mercure Hg 80 200,59 Dysprosium Dy 66 162,50 Molybdène Mo 42 95,96 10,280 Einsteinium Es 99 [252] Néodyme Nd 60 144,24 6,800 Élément 5,727 2,460 8,551 Élément 8,795 6,146 0,535 Annexe F ρ (g/cm3) 455 ρ (g/cm3) Élément Symbole Z M (g/mol) Rutherfordium Rf 104 [267] 20,45 Samarium Sm 62 150,36 7,353 58,693 8,908 Scandium Sc 21 44,956 2,985 41 92,906 8,570 Seaborgium Sg 106 [271] No 102 [259] Sélénium Se 34 78,960 4,819 Or Au 79 196,97 19,300 Silicium Si 14 28,086 2,330 Osmium Os 76 190,23 22,610 Sodium Na 11 22,990 0,968 Oxygène O 8 15,999 Soufre S 16 32,065 1,960 Palladium Pd 46 106,42 12,023 Strontium Sr 38 87,62 2,630 Phosphore P 15 30,974 1,823 Tantale Ta 73 180,95 16,650 Platine Pt 78 195,08 21,090 Technétium Tc 43 [98] 11,500 Plomb Pb 82 207,2 11,340 Tellure Te 52 127,60 6,240 Plutonium Pu 94 [244] 19,816 Terbium Tb 65 158,93 8,219 Polonium Po 84 [209] 9,196 Thallium Tl 81 204,38 11,850 Potassium K 19 39,098 0,856 Thorium Th 90 232,04 11,724 Praséodyme Pr 59 140,91 6,640 Thulium Tm 69 168,93 9,321 Prométhium Pm 61 [145] 7,264 Titane Ti 22 47,867 4,507 Protactinium Pa 91 231,04 15,370 Tungstène W 74 183,84 19,250 Radium Ra 88 [226] 5,000 Uranium U 92 238,03 19,050 Radon Rn 86 [222] Vanadium V 23 50,942 6,110 Rhénium Re 75 186,21 21,020 Xénon Xe 54 131,29 Rhodium Rh 45 102,91 12,450 Ytterbium Yb 70 173,06 6,570 Roentgenium Rg 111 [280] Yttrium Y 39 88,906 4,472 Rubidium Rb 37 85,468 1,532 Zinc Zn 30 65,38 7,140 Ruthénium Ru 44 102,91 12,370 Zirconium Zr 40 91,224 6,511 Symbole Z M (g/mol) Néon Ne 10 20,180 Neptunium Np 93 [237] Nickel Ni 28 Niobium Nb Nobélium Élément Pour les éléments dont tous les isotopes sont instables, la colonne de la masse molaire indique la masse molaire de l'isotope le plus stable entre crochets. 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 12 11 21 Consulter le site WebElements pour plus de détails. 56 Ba 137,33 55 Cs 132,91 ** actinides * lanthanides [226] ** 87,62 85,468 [223] 103 Lr 89-102 Sr Rb 88 38 37 Ra 40,078 39,098 87 Lu 174,97 * Ca K Fr 71 57-70 20 19 22 23 24 25 58 Ce 140,12 90 Th 232,04 57 138,91 89 Ac [227] 231,04 Pa 91 140,91 Pr 59 Hf 104 178,49 Hf 72 91,224 [267] La 41 50,942 V 26 42 51,996 43 54,938 27 28 29 30 106 183,64 W 74 95,96 61 [271] 76 101,07 108 190,23 109 192,22 Ir 77 102,91 110 195,08 Pt 78 106,42 32 28,086 47 48 65,38 80 112,41 111 196,97 112 200,59 Au Hg 79 107,87 113 204,38 Tl 81 114,82 In 49 69,723 114 207,2 Pb 82 118,71 Sn 50 72,61 15 115 208,98 Bi 83 121,76 Sb 51 74,922 As 33 30,974 P 238,03 U 92 144,24 62 [272] 63 [270] 64 [276] 65 [281] 94 150,36 95 151,96 96 157,25 97 158,93 [237] [244] [243] [247] [247] Np Pu Am Cm Bk 93 [145] 116 [209] Po 84 121,60 Te 52 78,96 Se 34 32,065 S 16 15,999 O 8 117 [210] At 85 126,90 I 53 79,904 Br 35 35,453 Cl 17 18,998 F 9 Ne 118 [222] Rn 86 131,29 Xe 54 83,80 Kr 36 39,948 Ar 18 20,180 66 [280] 67 [285] 68 [284] 69 [289] 70 [288] [251] Cf 98 162,50 100 167,26 101 168,93 102 173,06 [252] [257] [258] [259] Es Fm Md No 99 164,93 [293] [294] ? [294] Bh Hs Mt Ds Rg Cn Uut Fl Uup Lv Uus Uuo 107 186,21 Re 75 [98] 46 31 26,982 Cu Zn Ga Ge 58,693 63,546 Ni 14 Si 13 Al 14,007 N 7 Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb 60 [268] Db Sg 105 180,95 Ta 73 92,906 45 58,933 Co Ru Rh Pd Ag Cd 44 55,845 Cr Mn Fe Zr Nb Mo Tc 40 47,867 Ti [262] 88,906 Y 39 44,956 Sc 24,305 22,990 Na Mg C 12,011 10,811 B Be 9,012 2 Li 6,941 5 4 6 10 8 4,002 6 7 3 6 1,007 9 5 2 4 He 3 H 2 1 1 456 Annexe G Annexe G Le tableau périodique des éléments Les symboles des éléments sont ceux qui sont recommandés par l'International Union of Pure and Applied Chemistry. Réponses aux questions et exercices CHAPITRE 1 1 23 q(ii) < q(iv) < q(iii) = q(i) < q(v) de la partie b. positive de l'axe des y (b). ΔNe = 9,4 × 109 électrons 2 a. q = 1,5 nC 3 F = 9,649 × 104 C/mol 4 q = 5,36 × 107 C 5 a. La charge du conducteur est négative. 24 25 a. de l'axe b. b. c. des x 26 b. Le conducteur ne peut avoir de charge négative. La charge du conducteur est nulle. 25 a. Le conducteur est attiré vers la gauche (attractive), car un conducteur neutre est attiré par un objet chargé. b. La force est orientée vers la droite (répulsive), car le contact fait en sorte que la charge positive est partagée entre les deux sphères. Les deux sphères ont alors des charges de même signe et elles se repoussent. 8. 27 θ1 = 18,4° et θ2 = 9,44° 28 a. q1f = q2f = ±2,50 μC b.
q1i = 12,0 μC et q2i = −7,00 μC ou q1i = −12,0 μC et q2i = 7,00 μC 8 a. (iii) < (iv) < (i) < (ii) b. (i) < (ii) < (iii) < (iv) 9 a. (i) 9 a. 9,0 μC 29 (x 3 ; y3) = (0,83 ; 4,17) cm 10 a. 30 a.
c. b. 11 (i) < (iii) < (iv) < (ii) 12 a. Au point d 13 (i) = (iv) < (ii) = (iii) 14 r = 36 mm 15 q1 = 590 nC et q2 = −590 nC 16 a. Fe = 8,24 × 10 b. 31 b. q3 < 0 c. d. 32 −8 a. b. N a. b. 33 q = Q/2 c.
17 18 a. F1−2 = 1,90 N b. F2−1 = 1,90 N c. m1 = 0,825 kg d. m2 = 0,422 kg e. a1 = 0,575 m/s2 CHAPITRE 2 1 2 a. x = 2d/3 à droite de q1 a.
x = 6,00 cm à droite de q1 b.
q3 = −12,0 nC b. E = 8,6 × 102 N/C 3 a. Vers le haut 4 a. q = 2e = 3,20 × 10−19 C b. 21 22 c. E = 6,36 × 103 N/C a. c. Vers la droite e. Vers l'ouest b. q3 = −4q/9 20 b. Vers la droite d. Le champ est nul, donc il n'y a aucune orientation.
a. b. 19 a. Vers le haut 5 b. c. 6 d. 7 E = 1,38 × 104 N/C Réponses aux questions et exercices 458 8 a. Vers la gauche ou vers la droite, selon la position c. b. Vers la droite c. Vers la gauche d. d. Dans la région (i), car les champs produits par les charges sont opposés, et on est plus près de la plus petite charge en valeur absolue. 27 c. r = d − x e. Non, car les champs produits par les charges ne seront pas orientés dans la même direction. 9 avec des composantes y positives égales et des composantes x de valeurs opposées. 28 30 b. 31 a.
33 34 a. 35 13 Sur l'axe des x, à 20,5 cm de q1, du côté de q2 36 14 À x 3 = 2,84 cm 37 15 a. 16 a. b. 38 40 a.
b. b. 41 a. a. P3 > P2 > P1 (où E = 0) b. P1 > P3 > P2 42 b. E = 3,26 × 106 N/C a. b. a. p = 1,881 × 10−29 C · m = 5,639 D b. Non, car notre modèle donne une valeur 3,05 fois trop grande. 43 a. σ1 = 36 μC/m2 b. 44 a. b. 45 a. b.
46 a. Vers la droite pour a et b b. Vers la gauche pour a et b 22 23 a.
25 a. a. dq = λ dx c. Au point b, car les lignes sont plus rapprochées.
b. b. 26 a. 39 17 21 E = 2,52 × 107 N/C b. b. 20 a. b. b. 19 b. 29 a. c. E = 8,89 × 104 N/C 18 a. dq = λR dθ c.
b. 12 (attention : x < 0) d. b. L'énoncé (ii), car les charges produisent des champs 11 b. a. (iv), car les charges produisent des champs avec des composantes x positives égales et des composantes y de valeurs opposées. 10 a. b. c. r = d − x 47 q1 = −3 μC 48 a. Réponses aux questions et exercices b. 459 c. Le flux augmente d'un facteur π. d. Le flux diminue d'un facteur tiplié par (le flux est mul-). 5 ΦE = 0,00 N · m 2 /C 6 ΦE = 303 N · m2 /C 7 a. ΦE = 61,2 N · m2 /C b. Le flux est multiplié par 0,577. c. c. Le flux est multiplié par 1,53. 8 ΦE = 36 N · m2 /C 9 a. Φavant = 3,60 N · m2 /C Φarrière = −3,60 N · m2 /C Φdroite = −2,16 N · m2 /C 49 Φgauche = 2,16 N · m2 /C a. La vitesse change d'orientation.
Φhaut = Φbas = 0,00 N · m 2 /C b.
Le module de la vitesse augmente. c. Le module de la vitesse diminue. d.
Le module de la vitesse diminue. b. ΦE = 0,00 N · m 2 /C 10 b. Le flux est divisé par 2. e. Le module de la vitesse augmente. f. c.
Le flux devient nul. La vitesse change d'orientation.
d.
Le flux ne change pas. 50 11 ΦE = 1,92 × 105 N · m2 /C d. σ = 44,2 nC/m2 12 ΦE = −3,39 × 105 N · m2 /C b. t = 4,4 × 10−7 s 13 a. ΦE = −Eπ R 2 14 a. ΦE = −2,82 × 103 N · m2 /C a. a = 4,39 × 1014 m/s2 b.
v = 3,25 × 106 m/s c. E = 2,50 kN/C 52 a. d = 0,16 m 53 v = 2,2 × 106 m/s 54 q = −2e 55 a. vx = 6,93 × 105 m/s vy = −4,00 × 105 m/s 15 a. ΦE = −100 N · m2 /C b. Q int = −8,89 × 10−10 C 16 56 a. ΦE = −5Q/(2 0) b.
ΦE = 0 a. 17 b.
a. R max = 2,00 cm b. ΦE = −2,26 × 105 N · m2 /C c. Δy = 7,01 mm 58 a. Oui, la plaque du bas 59 f = 90° 60 τmax = 2,5 × 10−22 N · m 61 τ b. Δx = 0,069 34 m 18 est parallèle à la surface. Φ3 = −0,450 N · m /C et Φ5 = 0,900 N · m2 /C 2 c. Q int = 3,98 × 10−12 C a. (i) et (ii) b.
Les trois d.
(ii) e. (ii) 2 a. (i) b. (i) et (ii) c. (i) 3 a. (ii) b. (ii) c. (ii) 4 a. Le flux double. b. Le flux diminue de moitié. a. Φ1 = Φ2 = Φ4 = Φ6 = 0,00 N · m 2 /C, car b. ΦE = 0,450 N · m2 /C 19 La réponse est (v), car la charge à l'intérieur des trois surfaces est Q int = λL. 20 La réponse est (ii), car seul le cylindre a la même symétrie que la distribution de charges. 21 La réponse est (i), car le flux dépend uniquement de la charge à l'intérieur. L'énoncé (II) est faux, car la tige n'a pas la symétrie sphérique de la surface de Gauss. 22 a. r = 5,0 cm b. Q int = Q 1 c. r = 10 cm d. Q int = Q 1 + Q 2 CHAPITRE 3 1 b.
ΦE = Eπ R 2 b. ΦE = −471 N · m2 /C b. Δy = 7,1 mm 57 a. Le flux ne change pas.
c. Les trois Réponses aux questions et exercices 460 23 a.
b. E = 0 c. 42 24 25 a. E = 135 kN/C b. E = 120 kN/C a.
b. c. 28 43 a. b. c. 1 a. ΔU < 0 2 Wext = −6,4 × 10−4 J c. ΔU < 0 d. ΔU = 0 4 a. ΔU = −6,59 × 10−16 J 5 ΔU = −9,5 × 10−16 J 6 a. ΔU = −6,4 × 10−17 J b.
E = 2,42 × 103 N/C b.
v = 1,3 × 107 m/s e. 30 b.
ΔU > 0 3 d. 29 λ = 45 nC/m CHAPITRE 4 26 27 41 a. b. c. d. 7 a. V b − Va = 0 8 a. v augmente. b. V b − Va < 0 b. v ne change pas. c.
v diminue. e. r = 0,00 cm et r = 27,7 cm 9 ΔV = 1,1 kV a. 10 a. K f = 1 eV = 1,602 × 10−19 J b. c. V b − Va > 0 b. vf = 1,875 × 107 m/s c. d. 31 32 11 a. v = 1,53 × 107 m/s 12 a. Wext = 1,52 J b. ΔV = 2,44 MV b. Il faut fournir de l'énergie au système pour déplacer a. b. c. d. a. b. c. q = −10,7 nC la charge de l'infini au point P. 13 a. La plaque du haut 14 a. b. v = 1,72 × 107 m/s b. 33 35 a. Q int = −q b. Qext = −2q 36 a. E = 0,00 N/C b. E = 18,2 kN/C 37 a. σ = 9,38 μC/m2 c. λ = 24,2 nC/m 15 a.
b. b. 38 σ2 = −σ1r 1 /r2 39 a. b. c. d. b. ΔK = −94,5 × 10−3 J 16 a. V b − Va = 27,0 kV 17 Un travail nul, car la différence de potentiel est nulle. 18 a. e. 40 a. c. e. σint = 2,4 μC/m2 b.
d. σext = 3,3 μC/m2 b. V B < V D < VC < VA 19 a. Les points a et b, car ils sont plus près de la plus petite charge en valeur absolue. Réponses aux questions et exercices c. b.
Oui, les points a et b font partie d'une équipoten- tielle qui encercle la charge positive. 20 (iii) < (ii) < (i) 21 a. V b − Va = −5,4 × 105 V 46 a. (i) et (v) 461 b. (ii) < (i) = (v) < (iii) = (iv) 47 b.
V b − Vc = −5,4 × 105 V 22 V = 1,42 kV 23 a. Va = 1,4 × 106 V b. V b = −5,9 × 105 V c. Wext = 9,8 J 24 48 a. y = −3,00 cm et y = 1,50 cm b. b. x = 2,12 cm et x = −2,12 cm 25 q1 = −4,00 q2 26 (ii) < (i) = (iv) < (iii) 27 Wext = −1,16 J c. F = 2,80 N 50 51 (iii), car le potentiel est constant et continu à l'intérieur des conducteurs et il diminue en 1/r à l'extérieur. 52 a. (i) 28 b. (ii) 29 30 vi = 9,62 × 106 m/s 31 v = 132 m/s 32 a. U = −27,2 eV b. K = 13,6 eV 34 vi = 84,8 m/s 35 rmin = 362 pm 36 vp = 4,69 × 106 m/s ; vα = 1,18 × 106 m/s 37 a.
55 Q 1 = −16,3 μC et Q 2 = −8,70 μC 56 a. Q 1 = −2,14 μC et Q 2 = −3,86 μC c. N = 8,83 × 1013 électrons 57 c. V = 9,0 × 106 V b. r = d − x a. dq = λ dx b.
a. dq = λR dθ c. V = kλ π b. 6 6 a. V1 = 1,89 × 10 V b. V2 = 2,87 × 10 V 58 Wmoteur = 0,500 J 59 a. Wext = 6,0 J b. Q = 2,8 C 61 180° < θ < 360° (en sens antihoraire) 62 Umax = 2,11 × 10−23 J 63 U = −151 μJ CHAPITRE 5 1 5 c. V2 − V1 = 9,7 × 10 V 41 42 a. V = 2,6 × 106 V b. V = 3,9 × 106 V c. 40 Q = −10,0 nC c. Wext = 13,6 eV c. 39 53 b. V1 = V2 = −385 kV 33 38 a. b. La charge devient nulle. vi = 10,8 m/s 2 6 a. V1 = 9,81 × 10 V a. La charge reste constante. 6 b. V2 = 6,72 × 10 V a. La capacité reste la même. b. La capacité reste la même. c. V2 − V1 = −3,09 × 106 V c. La capacité reste la même. 43 σ = −1,26 × 10−5 C/m2 3 Q = 73,8 μC 44 ΔV = 1,81 × 104 V 4 a. Q i = −0,54 nC 45 a. (iii) < (ii) < (i) b. opposé à l'axe des y b. Q f = 0,24 nC c. i = 7,8 × 10−7 C/s 5 a. La capacité double. opposé à l'axe des y b. La capacité diminue de moitié. dans le sens de l'axe des y c. La capacité est multipliée par 2,5. Réponses aux questions et exercices 462 6 a avec C 2 et C 4 ; b avec C1 ; c avec C 3 7 a. κ = 7,45 8 Q = 15 nC 9 C = 71 pF 11 a. Q 1 /Q2 = 1 12 U(ii) < U(iii) < U(i) 13 a. C = 11,7 pF 14 uE = 4,0 × 10−5 J/m3 15 C = 10,0 pF 16 a. C = 1,00 μF b. d = 2,67 μm c. A = 641 cm 2 d. Q = 316 μC CHAPITRE 6 17 a. K = 0,16 J b. v = 1,1 m/s 1 i(ii) = i(iii) > i(iv) > i(i) 18 a.
Q i = 150 μC b. C = 50,0 μF 2 i = 4 mA, vers la gauche 19 W = 2,01 mJ 3 i = 27 mA, vers la gauche 20 W = 797 μJ 4 Né = 3,7 × 1021 électrons 21 (i) < (iii) < (ii) 5 i = 34 mA 22 a. C éq = 10,00 μF 6 a. n = 6,026 × 1028 m−3 35 b. Q 1 = 0,052 mC et Q 2 = 0,19 mC b. De la porcelaine b. (ΔV1)/(ΔV2) = 3 36 a. b. 37 a.
C éq = 29 nF b. C éq = 48 nF 38 b. Q = 8,45 nC c. U = 0,34 μJ 39 a. b. c. t = 8,33 C/s b. Q 1 = 120 mC et Q 2 = 0,80 mC c. ΔV1 = ΔV2 = 200 V 23 a. ΔV1 = ΔV2 = 34,7 V a. C éq = 2,40 μF b. Q 1 = Q 2 = 480 μC b.
vd = 7,34 × 10−6 m/s c. Δt = 1,58 jour 7 a. b. c. ΔV1 = 80,0 V et ΔV2 = 120 V 8 q = 24,0 C 24 C éq = 29,7 μF 9 a. 25 N=6 10 a. La densité de courant double. 26 C1 = 9,00 μF b. La densité de courant est divisée par 4. 28 U = 0,030 J d.
La densité de courant est plus faible dans le fil 30 a. C éq = 3,43 μF d'aluminium. b. Q 1 = 12,9 μC, Q 2 = 21,4 μC et Q 3 = 34,3 μC c. ΔV1 = ΔV2 = 4,29 V et ΔV3 = 5,71 V 31 11 a. σ = 5,21 × 106 A/(V · m) 12 a. d. U1 = 27,6 μJ, U2 = 45,9 μJ et U3 = 98,0 μJ b. a.
C éq = 10,80 μF c. ρ = 2,68 × 10−8 V · m/A b. i = 2,34 × 10−4 A b. U = 77,8 mJ 13 E = 61,1 mV/m c. Q 1 = 576 μC, Q 2 = 720 μC et Q 3 = 576 μC 14 a.
τ = 2,8 × 10−14 s 15 (ii), car la résistivité diminue lorsque la température diminue. 16 J diminue, car la résistivité de semi-conducteur augmente lorsque la température diminue. 17 T = 1,7 × 102 °C a. Q 1 = Q 2 = 37 μC, ΔV1 = 7,4 V et ΔV2 = 4,6 V 18 J = 0,124 A/m2 b. 19 R (i) < R (ii) < R(iii) d. ΔV1 = 48,0 V, ΔV2 = 120 V et ΔV3 = 72,0 V e. U1 = 13,8 mJ, U2 = 43,2 mJ et U3 = 20,7 mJ 32 a. C éq = 5,00 μF 33 a. Q 1 = Q 3 = 10,8 μC et Q 2 = Q 4 = 20,0 μC b. ΔV5 = 64,0 V b. Q1 = 10,3 μC, Q2 = 20,6 μC, Q3 = 11,6 μC, Q4 = 19,3 μC 34 b. b.
E = 3,1 mV/m c. du laiton Réponses aux questions et exercices 20 a. R 2 < R1 < R 3 6 La résistance est multipliée par 4 car la longueur est doublée, et l'aire de la section est divisée par 2 (le volume du fil ne change pas). 22 23 d = 10,6 mm 24 R = 0,014 3 Ω 25 R = 2,25 × 10−4 Ω 26 R = 16,7 Ω 27 a. ρ = 2,65 × 10 a.
i3 = 18,0 mA, vers le bas b. V b − Va = −2,75 V b. ΔV2 < ΔV1 < ΔV3 21 7 a. Q 1 = 138 μC b.
iR = 58,4 mA et iR = 6,72 mA 2 4 9 ΔV(ii) < ΔV(i) < ΔV(iii) 10 r = 0,63 Ω 11 r = 0,40 Ω 12 a. PE = 10,9 W b. Pr = 2,64 W c. P batterie = 8,26 W 13 −8 Ω·m 5 b. J = 3,77 × 10 A/m c.
E = 10,0 mV/m b.
N = 490 spires 2 14 b. 15 R = 0,835 Ω ou 0,147 Ω 28 a. R = 28,0 Ω 29 T = 421 °C 16 E = 0,687 V et r = 318 Ω 30 a. r = 0,016 Ω b.
i = 1,2 A c. vd = 0,55 mm/s 17 a. En parallèle b. En série c. En parallèle 31 i(iii) < i(ii) < i(i) < i(iv) 32 i = 4,00 mA 18 a. L'ampoule de 100 W 33 R0 = 23 Ω 19 (vi) < (ii) = (iii) < (iv) < (i) < (v) 34 a. i = 11,3 mA 20 a. ΔV = 4,8 V 35 a. i = 10,87 A 36 P = 25 W 37 P = 5,04 kW 38 a. P = 2,40 kW b. R no = 564 Ω b.
R = 10,6 Ω b. i = 10,0 A a. q = 4,00 mC b. P = 5,80 mW c.
ΔU = 0,348 J 40 a. R = 18,0 Ω b. L'ampoule de 60 W b.
R = 1,8 Ω ampoule est le même que le courant total, car les ampoules sont branchées en série. 21 PE = 1,90 W 22 a. Réq = 22,0 Ω b. Réq = 7,4 Ω c. Réq = 3,5 Ω d. Réq = 3,3 Ω e. Réq → ∞ f. Réq = 0,0 Ω 23 E = 1,3 V 24 b. R 0 = 17,3 Ω c. N = 269 spires CHAPITRE 7 25 a. PE = 0,383 W et V b − Va = −3,66 V b. PE = 0,635 W et V b − Va = 0,00 V 26 i1 = 0,112 mA et ΔV1 = 1,34 V a. Deux nœuds et deux mailles i2 = 0,179 mA et ΔV2 = 1,34 V b. Trois nœuds et trois mailles i3 = 0,291 mA et ΔV3 = 6,98 V c. Aucun nœud et une maille i 4 = 0,157 mA et ΔV4 = 8,33 V 2 i = 0,70 A, vers le haut i5 = 0,448 mA et ΔV5 = 3,67 V 3 a. i1 = i2 + i3 1 c. i = 2,7 A d. itotal = 2,7 A. Le courant qui circule dans chaque c. cout = 0,77 $ 39 463 27 a. b.
E1 − R1i1 − R4 i3 = 0 b. c. c. R = 2,86 Ω 4 i = 34,1 mA, en sens antihoraire 5 a. i = 1,08 A 28 ΔV2 < ΔV1 = ΔV3 b. ΔV1 = 81,1 V et ΔV2 = 38,9 V 29 a. iréel = 4,29 mA c. P 1 = 87,7 W et P 2 = 42,1 W c. Erreur relative = 2,8 % b. imes = 4,17 mA 464 30 Réponses aux questions et exercices a. ΔVréel = 23,5 V b. ΔVmes = 22,6 V c. Erreur relative = 4 % 32 a. 31 Erreur relative = 0,5 % b. U E = CE 2 32 iE1 = 38 mA, de la borne + à la borne − c. iE2 = 55 mA, de la borne + à la borne + 53 a. Qm = 16,8 μC c. τ = 97,8 ms iE3 = 16 mA, de la borne + à la borne − 33 i = 429 A CHAPITRE 8 34 a. i = 1,714 mA, vers la gauche 1 b. V b − Va = 1,004 V 35 39 2 a. b. d. c.
a. i2 = 933 μA, vers le bas b. R 3 = 2,00 kΩ c. R1 = 252 Ω 3 a. i3 = 0,670 mA b. V b − Vc = 8,00 V 4 c. V b − Vd = −4,00 V d. V b − Vf = 3,00 V La résistance ne surchauffe pas, car PR1 = 0,401 W < 0,500 W. a. PE = 1,73 mW, la pile absorbe de l'énergie.
1 b. i = 959 μA c. V b − Va = −6,59 V 6 7 8 9 i = 0,815 A ; en sens horaire 10 B P1 < B P3 < B P2 11 B P3 < B P2 < B P1 b. Les charges maximales sont toutes égales, car Qm = CE. 12 λ y = 4,7 cm c. im,(ii) < im,(i) < im,(iii) 13 λ 4,5 cm à gauche du fil 1 a. τ(ii) = τ(iv) < τ(i) = τ(iii) 14 40 L'intensité initiale est élevée. Ensuite, l'intensité diminue graduellement jusqu'à ce qu'elle atteigne zéro. 41 a. τ(ii) < τ(i) < τ(iii) 42 ‹ d. b. ΔV1 = 5,50 V ; ΔV2 = 2,50 V ; ΔV3 = 4,00 V 38 b. 1 iE3 = 0,000 A 37 a. c. a. iE = 0,500 A, vers le haut iE2 = 0,500 A, vers le bas 36 b. L'armature inférieure b. R (ii) = R (iv) < R(i) = R (iii) c. im,(iii) < i(i) = im,(iv) < im,(ii) 44 15 a. ΔVC = 75,9 V 16 b. ΔV R = 44,1 V a. c. U E = 0,056 J b. y = ±d 45 t = 19 ms c. 46 a. t = 41,6 ms b. t = 20,8 ms 47 a. τ = 3,75 s b. Qm = 775 μC 48 a. t ½ = RC ln 2 17 c. i = 54,4 μA 18 a. μ vers le bas ; μ vers le haut ; μ vers le haut ; μ vers le bas b. Le graphique est une droite, dont la pente est C ln 2 et l'ordonnée à l'origine, zéro. 49 a. Q = 10,2 μC b. i2 = 357 μA 50 a. i = 17,3 mA b. Q = 130,0 μC 51 a. i1 = 110 mA et i2 = i3 = 54,8 mA b. i1 = i2 = 82,2 mA et i3 = 0,00 mA c. t = 48,7 ms 19 vers le haut ; vers le bas vers le bas ; vers le haut ; Réponses aux questions et exercices 20 a. μ 6 a. μ = 0,022 A · m2 b. i = 71 A 7 23 a. 24 (iii) < (i) < (ii) 25 (i) < (iii) < (ii) = (iv) 26 (iv) < (i) < (ii) < (iii) 27 a.
8 a.
v = 6,23 × 105 m/s 9 a. b. Vers l'ouest b. 10 a. est entrant, et est sortant. b. La région 2, car le rayon de courbure est plus petit. 11 a. Les ions 3 et 4 12 B = 492 μT b. 13 a. T = 2,92 × 10−7 s c. 14 a. v = 8,8 × 106 m/s 15 a. b. Le faisceau est dévié vers l'est. b. a. = 6,3 × 1015 m/s2 16 i = 2,50 A 29 a. B = 31,8 μT 30 a. b.
c. d. B = 0 b. B = 60,0 μT c. B = 6,15 μT d. B = 0,0 μT 34 a. 35 B1 = B2 < B 4 < B 3 36 i = 8,19 A a. R = 2,05 Ω 39 a. b. a. Δt = 1,1 μs 18 a. f = 71° 19 a. orienté selon b. orienté selon c. orienté selon c. b. CHAPITRE 9 b. p = 1,83 mm b. p = 0,59 m c. r = 0,27 m a.
(ii), car b. (iii), car Fm > Fe b. B = 5,42 mT a. T = 2,38 × 10−10 s 17 20 37 38 b. v = 1,8 × 107 m/s c. r = 1,09 mm b. B = 50,0 μT a. B = 53,3 μT B = 20,6 μT b. Fm = 5,56 × 10−14 N c.
r = 0,67 m 28 33 b. m 4 < m1 < m2 < m3 c. B = 0,224 T d. 40 a. v = 1,19 × 108 m/s b. 22 31 a. b. b.
21 c.
(i), car Fm < Fe 21 v = 5,27 × 105 m/s 22 a. f = 2,1 × 106 Hz 24 M = 33,97 u 25 a. Va > V b 26 Entre a et c 27 B = 0,76 T 28 a. ΔV H = 0,11 μV b. v = 3,4 × 106 m/s b. Vc > Vd c. Ve > Vf b.
vd = 18 μm/s c.
E H = 13 μV/m 29 1 F(i) = F(iv) (forces nulles) < F(ii) = F(iii) < F(v) 30 a. B1 = 8,94 mT 2 a. Non, la force doit entrer dans la page. 31 La force magnétique est vers la gauche. b. Non, la force doit être perpendiculaire à la vitesse.
32 Le courant doit être vers la droite. c. Oui, la force a la bonne orientation. 33 F(i),x < F(iii),x < F(ii),x < F(iv),x q1 est négative, et q2 est positive. 34 F/ = 8,33 × 10−6 N/m 35 a. i = 7,50 A 3 4 5 465 b. B2 = 20,6 mT b. Les sens des courants sont opposés. d. V h > Vg Réponses aux questions et exercices 466 36 37 m = 102 mg 5 ΦB = 6,72 × 10−4 Wb 6 i = 1,72 A 38 7 39 8 40 9 41 10 a. b. 42 11 a. b. 43 a. (i) en sens horaire et (ii) en sens antihoraire b.
ΔU < 0 dans chaque situation 44 12 13 a. c. a. b.
14 i = 2,0 × 10−9 A 15 a. E = 13,9 mV 16 a. En sens horaire b. et peuvent faire tourner le cadre dans le sens horaire. Les forces et ne peuvent pas faire tourner le cadre. c. En sens antihoraire d. En sens antihoraire 17 18 a.
μ c. Dans le sens horaire, selon une vue en plongée K max = 0,03 J 47 Wext = 1,77 × 10−5 J 48 τ 19 20 21 a. Émf = 0,166 V b. i = 0,134 A c. Vers la droite a. c. μorb,z = −3μB b. −23 A·m −24 A · m2 a. μorb,z = 2μB = 1,85 × 10 b. μs,z = −μB = −9,27 × 10 54 a. iind = 16,2 mA b. En sens horaire 50 53 a. iind = 57,0 mA b. En sens antihoraire 49 52 a. E = 75 μV b.
En sens horaire b. τ 46 a. E = 2,54 mV b. En sens antihoraire d. τ = 0,015 N · m 51 c. P = 24,2 μW b. En sens antihoraire e. Les forces 45 b. R = 8,00 Ω 2 c.
Vers la gauche 23 a. En sens horaire b. B = 1,34 × 105 T a.
22 24 b. Umax = 1,39 × 10 −4 d. Umin = −1,39 × 10 e. E abs = 6,95 × 10−5 eV eV 25 E = 2,53 V 26 a. E = 0,522 V b. i = 3,48 mA CHAPITRE 10 1 Les situations (i), (iii) et (v) 2 Φb < Φa < Φc 3 Φa = Φb = Φc 4 ΦB = 0,012 0 Wb a. Il n'y a pas de courant induit. b. En sens antihoraire eV −4 vers le haut 27 a. i = 0,200 A c. e. PR = 0,389 W 28 a. E = 45,0 μV b. b. En sens antihoraire d. Pext = 0,389 W Réponses aux questions et exercices c. i = 3,75 μA, en sens antihoraire 4 d. b. b.
29 a.
30 a.
i = 1,70 mA, en sens antihoraire 5 b. t = 0,127 s et t = 1,56 s 6 L 4 < L 2 < L1 = L 5 < L 3 c.
t = 0,844 s 7 a. Le courant augmente ; b. le courant diminue ; c. le courant est constant. a. b.
8 t 1 < t2 = t5 < t3 = t 4 9 |EL| = 1,05 V 10 a. |EL| = 0,720 V b. La borne de droite c. 32 a. M = 1,18 mH b. |Esol | = 47,4 mV d. i = 4,41 mA, en sens horaire 31 a. a.
iind = 56,8 μA, en sens antihoraire b. PR = 2,74 × 10−9 W 11 L/ = 302 μH/m 12 a. ΦB = 1,37 μWb b. L = 20,6 μH c. 33 iind = 92,4 mA 13 EL = 36,9 V 34 Em = 1,52 V 14 a. L éq = L1 + L 2 35 a. E = 1 018 sin(50πt) V b.
b.
Em = 1 018 V 15 c. b. L éq = L1 + L2 + M 36 N = 8,0 spires 37 Em = 0,15 mV 38 a. 16 17 i(ii) < i(iii) < i(ii) b. 18 (i) < (iii) < (ii) c. Em = π 2r 2 Bf 19 a.
τ(i) = τ(iii) < τ(ii) b. (i) = (iii) < (ii) < L (ii) 39 parcours (i) < parcours (ii) = parcours (iii) 40 E = 6,60 × 10−6 V/m 41 a. E = 23,6 μV/m 43 est sortant, et c. E (iii) = E (iv) < E (i) < E (ii) b. E = 39,4 μV/m est entrant. 20 t = 1,11 ms 21 a. τ = 495 μs b. pour t → ∞ c. im = 90,9 mA d. PL = 18,9 mW a. t = 2,12 ms b.
ΔV L = 6,36 V 22 b = 16,8 μT c. PR = 0,963 W 44 45 a. b. d. 42 a. t = 1,2 s 46 a. E = 16,4 μV/m 48 b. i = 160 mA ; i3 = 0 mA b. i1 = 274 mA ; i2 = i4 = 103 mA ; i3 = 171 mA CHAPITRE 11 c. i1 = i2 = i3 = i 4 = 171 mA 1 a. E1 = 0,129 V b. iind = 103 mA 2 M = 128 mH 3 a. M = 1,47 μH b. E = 2,24 mV c. i = 4,07 mA d. Dans le sens horaire d. EL = 27,4 V 25 28 a. R = 2,55 Ω b. L = 3,83 mH c. τ = 970 μs d. i = 0,977 A U3 < U1 < U2 467 Réponses aux questions et exercices 468 29 L = 0,749 H 30 a. i = 82,5 mA b. U L = 3,75 mJ c. PR = 3,20 W d. PE = 4,13 W 31 a. U L = 42,2 mJ 32 a. U L = 767 μJ 6 b. t = 5,20 ms c. PL = 2,81 W b. B = 1,23 mT c. uB = 0,598 J/m3 33 a. U = 0,347 J/m3 a. ω = 1,08 × 10 rad/s 36 a. T = 6,00 ms a. ω = 159 rad/s b. L = 0,192 H b. U L = 6,04 μJ 2 d. émc = 21,6 μJ ; elle est conservée. 38 i(i) < i(iii) < i(ii) 9 f/f0 = 1/2 10 XC devient deux fois plus grande. 11 a. XC = 21,2 Ω b. im = 2,29 A c. UC = 11,0 μJ et UC = 4,59 μJ 1 a. t = 318 μs a. XC = 585 Ω b.
C éq = 3,47 μF c. f = 78,3 Hz 15 Em /E0m = 2 16 a. im = 0,102 A b. f = 3,67 kHz 17 a. X L = 21,2 Ω b. iLm = 80,1 mA c. iL = −70,2 mA d. E = 0,00 V a. L = 24,99 mH b. X L = 10,68 Ω c. im = 0,421 4 A d. i = 0,379 4 A 41 20 a : une résistance, b : une bobine d'induction, c : un condensateur 21 (i), (iii), (v), car la charge, f < 0. 22 a. Le courant est en retard. b. Le circuit est plutôt inductif. CHAPITRE 12 a. iL = −84,4 mA b. ΔV L = 11,6 V c.
amplitude = 35,4 μC a. f = π rad d.
i1 = 0 A d. Q = −20,1 μC 1 c. iC = −10,7 mA c. iC = 400 μA 19 a. ω0 = 685 rad/s b. iCm = 15,4 mA b. Q 2 = 1,79 μC 18 Régime critique : (ii) et (iii) a. XC = 2,44 kΩ a. C 2 = 124 nF Régime surcritique : (i) et (v) 40 b. im = 0,349 A 13 b. PL = 61,2 sin (4,45 × 103t) W 39 d. Em = 12,0 V c. fC = −π/2 rad c. U Lm = 72,8 μJ 37 c.
iR = −61,9 mA i1m = 91,2 mA, i2m = 36,3 mA et i3m = 54,8 mA 12 35 b. f = 55,7 Hz 7 b. 3 a. iRm = 176 mA b. f = π/2 rad c. ΔV Lm > ΔVCm c. f = 0 rad d. f = −π/2 rad 23 C = 1,4 μF a. 24 a. f = f0 = 87,6 Hz b. im = imax = 3,78 A c. ΔV Rm = 170 V, ΔV Lm = ΔVCm = 312 V 25 a. Z = 332 Ω b. f = 0,160 rad = 9,17° b. c. Le circuit est plutôt inductif. d. ΔV Rm = 11,9 V, ΔV Lm = 6,99 V et ΔVCm = 5,07 V 3 a. f = 40 Hz b. Em = 30 V 26 a. im = 78,3 mA 27 f = 39 Hz 28 a. i = 0,899 A b. ΔV R = 108 V, ΔV L = −10,3 V, ΔVC = 72,3 V c. E = 30 V sin (80π t) 4 5 b. ΔV Lm = 2,91 V L'amplitude du courant ne change pas, car celle-ci ne dépend pas de la fréquence. 29 i(i) < i(iii) < i(ii) 30 a. Z = 400 Ω b. ΔV Rm = 14,5 V c. R = 388 Ω d.
L = 27,5 mH a. im = 0,120 A b. im = 0,200 A Réponses aux questions et exercices 31 a. ω 0 = 408 rad/s a. Z = 14,5 Ω b.
cos(f) = 0,697 b. ω1 = 314 rad/s, ω2 = 531 rad/s c. Pmoy = 38,5 W d. En retard, car f > 0 c. Δω/ω 0 = 0,530 e. Non car f > 0 f. 32 Pmoy = 0,258 W 33 a. C = 176 μF 39 40 b. cos f = 1,00 a. Z = 43,0 Ω b. f = 0,620 rad c. ieff = 2,79 A d. Pmoy = 272 W 35 a.
Z = 51,5 Ω b. Pmoy = 198 W 36 a. R = 144 Ω b. L = 1,15 H 37 a. Pmoy = 1,08 kW b. Z = 19,0 Ω d. C = 420 μF 38 a.
b. i1,eff/i2,eff = E2,eff/E1,eff = 1/2 c. Pmoy = 22,9 W 34 c. PR /PR = 3/4 1 41 2 a.
R app = 20,0 Ω b. Np/N s = 20,0 c. ip,eff = 15,0 mA c. L = 16,8 mH 42 Np/N s = 12 43 a. Es,eff = 5,00 kV b.
is,eff = 0,185 A c. Réq = 15,6 Ω e. Pmoy,max = 1,32 kW a. Z = 194 Ω 44 Pmoy = 6,05 kW b. i = 81,4 mA sin(500t + 0,384) 45 a. ip,eff = 0,244 A c. Pmoy = 0,596 W Oui, car f > 0 g. Oui, car cos f ≠ 0 c. ΔV2,eff = 17,6 V b. ΔV1,eff = 14,6 V 469 470 Réponses aux questions et exercices Crédits Page couverture : Carl Johnson Chapitre 1 : p. 3: René Lafrance ; p. 4 : EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES/AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS/SCIENCE PHOTO LIBRARY ; p. 5 : S_E/Shutterstock.com ; p. 15 : Wikipedia Commons. Chapitre 2 : p. 33 : Narchuk/Shutterstock.com ; p. 34 : Michael Faraday by Thomas Phillips. National Portrait Gallery/Wikipedia Commons. Chapitre 3 : p. 81: PETER MENZEL/SCIENCE PHOTO LIBRARY ; p. 82: Wolfgang Volk ; p. 94: Carl Friedrich Gauss by G. Biermann. Photo A. Wittmann/Wikipedia Commons. Chapitre 4 : p. 119 : John Ludd/Getty Images ; p. 126 : Dr. Manuel/Wikipedia Commons ; p. 146 : Nitromethane/Wikipedia Commons ; p. 149 : ADAM HART-DAVIS/ SCIENCE PHOTO LIBRARY. Chapitre 5 : p. 163:© LesCunliffe/Dreamstime.com ;p. 164: Wikipedia Commons. Chapitre 6 : p. 189 : lenetstan/Shutterstock.com ; p. 203 : Rama/Wikimedia Commons ; p. 205 : SHEILA TERRY/ SCIENCE PHOTO LIBRARY ; p. 208 : René Lafrance. Chapitre 7 : p. 219 : Don Farrall/Getty Images ; p. 221 : Rama/Wikimedia Commons ; p. 228 : René Lafrance. Chapitre 8 : p. 253 : Maximilien Brice, CERN ; p. 254 : Martinonline/Wikipedia Commons ; p. 257 : imagedb.com/ Shutterstock.com ; p. 258 : Gary A. Glatzmaier (University of California, Santa Cruz) and Paul H. Roberts (University of California, Los Angeles) ; NGDC ; SCIENCE PHOTO LIBRARY ; p. 272 : SHEILA TERRY/SCIENCE PHOTO LIBRARY. Chapitre 9 : p. 293 : United States Air Force photo by Senior Airman Joshua Strang ; p. 297 : LAWRENCE BERKELEY LABORATORY/SCIENCE PHOTO LIBRARY ; p. 301 : NASA/Van Allen Probes/Goddard Space Flight Center ; NASA/SCIENCE PHOTO LIBRARY ; p. 306 : © 2008 CERN, for the benefit of the CMS Collaboration ; p. 325 : © 1992 Richard Megna – Fundamental Photographs ; p. 326 : Splarka/Wikipedia Commons ; Saperaud/ Wikipedia Commons. Chapitre 10 : p. 337 : Hydro-Québec ; p. 338 : © Thomas Jenkins/Dreamstime.com ; p.
364 : Fonollosa/Iberfoto/The Image Works. Chapitre 11 : p.
375 : © Rainfall/Dreamstime.com;p. 381 : © BigJoker/iStockphoto. Chapitre 12 : p. 407 : Scott Rothstein/Shutterstock.com ; p. 430 : René Lafrance ; p. 433 : © Nickondr/iStockphoto. Index A Aimant, 255-257, 325, 326 pôles, 255 temporaire, 256 Alpha, particule, 77 (E52) Alphabet grec, 452 Ampère boucle d', 274 théorème d', 274 théorème d'-Maxwell, 359-362, 364 Ampère, André-Marie, 191, 254, 272 Ampèremètre, 233 Amplitude, 393 de la charge dans un circuit RLC, 396 de la f.é.m., 408 du courant, 409 circuit RLC, 420 dans un condensateur, 411 dans une bobine d'induction, 418 dans une résistance, 411, 412 Bobine d'Helmholtz, 287 (P23) d'induction, 379 amplitude du courant, 418 circuit LC, 391-395 circuit RL, 382-385 circuit RLC, 395-396, 419-425 courant alternatif, 416-418 réactance inductive, 418 symbole, 379 énergie dans une, 388 hélicoïdale, voir Solénoïde inductance, 379 inductance mutuelle, 377 toroïdale, 277, 278 Bohr magnéton, 322 modèle de, 28 (E16), 77 (E53), 157 (P33) Bohr, Niels, 77 (E53), 157 (P33) Boucle d'Ampère, 274 Bougie d'allumage, 381 Angström, 445, 447 Bouteille de Leyde, 2 magnétique, 300, 301 Année lumière, 447 Branche, 220 Annihilation, 9 Antiparticule, 9 Arc électrique, 146 Armatures d'un condensateur, 164 Atome, 7 Aurore polaire, 301 Auto-induction, 379-381 f.é.m., 380-381 B Balance de torsion, 2 Batterie, 150 Biot, Jean-Baptiste, 260 C Cage de Faraday, 83, 104 Capacité d'un condensateur, 164 avec diélectrique, 170 cylindrique, 168 équivalente en parallèle, 174 en série, 176 plan, 167 sphérique, 169 unité, 164 Capteur à effet Hall, 309 Biot-Savart, loi de, 260-264 Ceintures de radiation de Van Allen, 301 Bloc d'alimentation, 433 Cellule photovoltaïque, 150 Cérès, 82 Champ électrique à partir du potentiel, 142 constant, 35 d'un anneau, 53 d'un disque, 54 d'un plan infini, 57, 100 d'une sphère, 95, 96 de plaques parallèles, 58, 106 définition, 34-35 densité d'énergie, 173 disruptif, 146 et différence de potentiel, 126 et énergie potentielle, 121 et potentiel électrique, 129 flux du, 87-90 force électrique, 36 induit, 356-357 principe de superposition, 39 rigidité diélectrique, 170 tableau de module, 35 uniforme, 35, 57 et énergie potentielle, 122 unité de, 35, 126, 127 Champ magnétique d'un barreau aimanté, 257, 270 d'un dipôle, 269 d'un fil, 258, 263-265 d'un solénoïde idéal, 280 points éloignés, 270 points sur l'axe, 282 d'une boucle de courant, 267-269 et champ électrique, 362 et flux électrique, 362 en points éloignés, 294-295, 311-314 induit, 362 terrestre, 257 unité de, 260 472 Index Champs croisés, 302 Charge densité de, 44 distribution continue, 44-49 élémentaire, 7 libre, 108 induite, 108 liée, 108 ponctuelle, 37 champ électrique, 37 dans un champ électrique, 62-67 dans un champ magnétique, 297-301 lignes de champ électrique, 60 potentiel électrique, 131-134 porteur de, 191 principe de conservation de la, 8 propriétés, 7-10 quantification de la, 7 surfacique, 44 test, 35 unité de, 7 volumique, 44, 45 Circuit en courant continu, 221-240, 391-395 énergie dans le, 394 RC, 237-241 redresseur, 433-434 RL, 382-385 RLC en courant alternatif, 419-425 en courant continu, 395-396 Circuit électrique, 218 Coefficient thermique de résistivité, 201 tableau, 199 Compteur de Geiger-Müller, 155 (P14) Condensateur, 164 amplitude du courant, 415 armatures, 164 association de, 174-180 avec diélectrique, 169-170 capacité, 164 charge d'un, 165 circuit LC, 391-395 circuit RLC en courant alternatif, 419-425 en courant continu, 394-396 constante de temps, 414, 415 cylindrique, 167 dans un bloc d'alimentation, 414-415 différence de potentiel, 222 en parallèle, 174 en série, 175 énergie emmagasinée dans, 171-173 plan, 167 réactance capacitive, 415 sphérique, 169 symbole, 174 Conducteur, 11 courant dans, 203-205 en équilibre électrostatique, 102107, 144-147 induction électrique, 12-13 Conduction, modèle, 195-199 Conductivité, 198 Constante de Coulomb, 16 de Faraday, 27 (E3) de phase, 409 circuit RLC, 422 pour un condensateur, 415 pour une résistance, 411, 412 diélectrique, 108, 170 tableau, 170 électrique, 16, 167 magnétique, 261, 380 Convention de la main droite, 260 Coulomb (unité), 7, 16 Coulomb, Charles Augustin de, 2, 15, 254 Courant de déplacement, 361 Courant électrique, 190-194 alternatif, 98 (voir aussi Courant alternatif) amplitude, 410 de Foucault, 351, 352 direct, 245 drift, 193 efficace, 429 électronique, 191 … (voir aussi Courant alternatif) 190-194, 410, 411 … champ magnétique, 258, 259 dans les conducteurs, 203-205 dans une résistance, 411 densité de, 193 diviseur, 228 efficace, 429 différence de potentiel, 204, 205 Cyclotron, 304, 305 D Davy, Humphry, 338 Debye (unité), 42 Debye, Peter, 42 Déclinaison, 258 Défibrillateur cardiaque, 172-173 Densité d'énergie électrique, 173 électromagnétique, 390 magnétique, 389 de charge, 44 de courant, 193 de porteurs de charge, 193 expérimentale, 309 Déphasage, 409 Dérivée, 452 partielle, 142 Développement en série, 451 Diamagnétisme, 326 modèle du, 358 Diélectrique, 108 constante, 108, 170, 448 dans un condensateur, 169-170 permittivité, 109 rigidité diélectrique, 170 Différence de potentiel, 125 d'un condensateur, 222 d'une charge ponctuelle, 132 d'une résistance, 222 Diode ponctuelle, 132 d'une f.é.m., 221 de Hall, 307 efficace, 427 et champ électrique, 126 et courant électrique, 204, 205 Diode, 209, 433 symbole, 433 Dipôle électrique, 15, 41 champ électrique, 67-68 énergie potentielle, 152 induit, 41 lignes de champ, 60 moment de force sur, 68 moment dipolaire, 42 permanent, 42 Dipôle magnétique, 256 champ magnétique, 315-320 non uniforme, 315 énergie potentielle, 317 force sur un, 316 Dispositif bobine d'induction, 379 condensateur, 164 diode, 209 non ohmique, 209 ohmique, 208 résistance, 208 Diviseur de courant, 228 Domaine magnétique, 325 Dopage, 202 E Effet à distance, 34 couronne, 146 de pointe, 146 Hall, 307-309 Joule, 212 photoélectrique, 127-128 Électron, 7 de conduction, 11 473 Électron-volt, 127 Faraday, Michael, 35, 164, 338, 339 Électroscope, 13 Ferromagnétisme, 325 Électrostatique, 35 Flux électrique, 87-90 et lignes de champ, 87 Élément infinitésimal, 45 Énergie électrique, 121 dans les circuits LC, 394 densité d'énergie, 173 électromagnétique, 389 mécanique, 121 conservation de l', 128 potentielle, 121 d'un atome dans un champ, 323 d'un dipôle électrique dans un champ, 152 d'un dipôle magnétique dans un champ, 317 dans un condensateur, 172 dans une bobine, 388 de charges ponctuelles, 135-136 électrique, 120 et potentiel électrique, 122 pour un champ uniforme, 122 Équations de Maxwell, 363-365 Expérience de Millikan, 77 (E54) F F.é.m. (force électromotrice), 150 d'auto-induction, 380-381 efficace, 427 en courant alternatif, 408 induite, 343 dans un conducteur en mouvement, 338-350 mouvement, 344 motionnelle, 346, 348 … de Lenz, 346 … Frottement, 2 … Franklin, Benjamin, 2, 3, 4, 6 … 4,5 Force électromotrice, voir F.é.m. … loi de … 305 (Lorentz), 305 … G Gauss, Carl Friedrich, 83, 94 Geiger-Müller, compteur, 155 (P14) Générateur, 150, 353-354 474 Index Générateur de Van de Graaff, 148-149 Gilbert, William, 254 Gradient, 142 H Hall effet, 307-309 Hall, Edwin Herbert, 307 Heaviside, Oliver, 364 Henry (unité), 377, 379 Henry, Joseph, 340, 377, 379 Hertz, Heinrich, 365 I Impédance, 420 Inclinaison, 258 Inductance, 377 voir aussi bobine d'induction d'un solénoïde, 380 mutuelle, 376-377 Lavoisier, Antoine, 338 Lenz, loi de, 345, 346-349 Moment dipolaire électrique, 42 magnétique, 270, 271 intrinsèque, 322 orbital, 320 LHC, 306 Monopôle magnétique, 256 Lenz, Heinrich, 345 Lignes de champ électrique, 60-62 et flux électrique, 87 champ magnétique, 257, 270 de force, 34 Loi d'Ohm, 205 Lorentz, force de, 301, 364 Lorentz, Hendrik Antoon, 301 Ohm, loi d', 208 microscopique, 199 Lumière, 365 Ondes électromagnétiques, 365 Intégrale, 46, 453 curviligne, 121 de surface, 88, 89 Magnéton de Bohr, 322 Intensité électrique Maxwell équations de, 363-365 théorème d'Ampère- , 359-362 Isolant, 11, voir aussi diélectrique polarisation des, 14-15, 68 J Joule, effet, 212 Joule, James Prescott, 212 K Kirchhoff, Gustav Robert, 221 Kirchhoff, lois de, 220-222, 234-235 N Lois de Kirchhoff, 220-222, 234-235 M Ionisation, 8 Multimètre, 233 Neutron, 7 Induction électromagnétique, 340 Ion, 8 Moteur électrique, 318, 338 Loi d'Ohm, 208 microscopique, 199 de Biot-Savart, 260-264 de Coulomb, 15-24 de Faraday, 343, 356, 364 de Lenz, 345-346 des mailles, 221 des nœuds, 220, 222 Induction électrique, 12-13 Interaction d'échange, 325 Moment dipolaire électrique, 42 unité du, 42 Maille, 221 loi des, 221 Maxwell, James Clerk, 338, 359, 361 Millikan, Robert, 77 (E54) Miroir magnétique, 301 Mise à la terre, 11 Modèle de Bohr, 28 (E16), 77 (E53), 157 (P33) de l'atome, 7 Moment de force sur un dipôle électrique, 68 sur un dipôle magnétique, 316 Nœud, 192 loi des, 192 Nombre quantique magnétique, 321 orbital, 321 O Ohm, Georg Simon, 205, 208 Onnes, Heike Kamerlingh, 202 Orage solaire, 301 Ørsted, Hans Christian, 254, 258, 338 P Paramagnétisme, 325 Parsec, 447 Particule alpha, 77 (E52) Perméabilité du vide, 261 Permittivité, 109 du vide, 16 Phaseur, voir vecteur tournant Piazzi Giuseppe, 82 Pile, 126, 149 idéale, 150 réelle, 224-225 résistance interne, 224 Plasma, 300 Point de référence, 128 Poisson, Siméon, 82 Index Polarisation des isolants, 14-15, 68 Pôle d'un aimant, 255, 256 Porteur de charge, 191 densité de, 193 Positon, voir positron Positron, 9 Potentiel électrique, 125-128 calcul du champ électrique, 141 dans un anneau, 139 électrostatique, 144 d'un disque, 140 d'un fil infini, 129 d'une distribution continue, 137-140 d'une sphère conductrice, 131-134 et charges ponctuelles, 131-134 et énergie potentielle électrique, 125 et champ électrique, 129 point de référence, 128 source de, 148-150 surface équipotentielle, 130 unité de, 126 Précipitateur électrostatique, 158 (P44) Principe de conservation de la charge, 8 de superposition, 19, 39, 261 Produit vectoriel, 261, 452 Proton, 7 Puissance d'un appareil, 211 d'une f.é.m., 211 d'une pile réelle, 211 dans les circuits, 210-212 dans les circuits à courant alternatif, 426-428 dans une résistance, 212 facteur de, 428 moyenne dans les circuits à courant alternatif 427 Q Quantification de la charge, 7 du moment cinétique, 321 Quarks, 8 R Rayon gamma, 9 Réactance capacitive, 415 inductive, 418, 415 475 tableau, 199, 448 Résonance, 424 Rigidité diélectrique, 170 tableau, 170, 448 S Régime critique, 397 surcritique, 397 Savart, Félix, 260 Règle de la main droite champ magnétique d'un fil, 259 d'un solénoïde, 281 d'une boucle, 269 dans la loi de Faraday, 356 dans le théorème d'Ampère, 275 Solénoïde, 270, 279 champ magnétique sur l'axe, 282 idéal, 280 champ magnétique, 281 inductance, 380 moment magnétique, 270, 271 Représentation de Fresnel, 410 circuit RLC, 419 condensateur, 415 résistance, 412 Résistance, 207 amplitude du courant, 412 association de, 226-231 circuit RC, 237-241 circuit RL, 382-385 circuit RLC en courant alternatif, 419-425 en courant continu, 395-396 courant alternatif, 411-412 différence de potentiel, 222 dispositif, 208 en parallèle, 229 en série, 227 interne d'un ampèremètre, 233 d'un voltmètre, 233 d'une pile, 224 loi d'Ohm, 208 puissance, 212 Résistivité, 198, 199 et température, 200-203 Sélecteur de vitesse, 302 Semi-conducteur, 202 Source de f.é.m., 150 différence de potentiel, 221 Spectromètre de masse, 304 Spin, 322 Stimulateur cardiaque, 241, 242 Supraconducteur, 202 Surface de Gauss, 92 équipotentielle, 130-131 fermée, 90 Symétrie cylindrique, 84 plane, 85 sphérique, 85 Synchrotron, 304, 305 Syntoniseur, 186 (P39), 425 T Température de Curie, 326 Tesla (unité), 260, 295 Tesla, Nikola, 260 Théorème d'Ampère, 274 d'Ampère-Maxwell, 359-362 de Gauss, 94, 364 configurations cylindriques, 98 configurations planes, 100 configurations sphériques, 95, 96 dans la matière, 109 en magnétisme, 273, 364 476 Index Transformateur, 429-432 abaisseur, 431 élévateur, 431 symbole, 430 Van Allen, ceinture de radiation, 301 Volt, 126 Van Allen, James Alfred, 301 Vitesse Travail, 120-122 Van de Graaff, Robert, 148 Triboélectricité, 10 TRIUMF, 306 U Unité astronomique, 449 V Valeur efficace, 427 Van de Graaff, générateur de, 148-149 Vecteur aire, 87, 88, 269 de Fresnel, voir vecteur tournant produit vectoriel, 261, 452 tournant, 410 unitaire normal, 57, 86, 90 radial, 17, 37, 260 de dérive, 192, 193 de la lumière, 365 Volt, 126, 150 Volta, Alessandro, 126, 254 Voltmètre, 233 Von Guericke, Otto, 254 W Weber, Eduard Wilhelm, 82 Fin Abaisseur 316 ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME 2 Conçu ici pour les étudiants d'aujourd'hui Les trois tomes de cette collection originale, testée et éprouvée en classe, mettent en œuvre une approche intégrée de l'enseignement de la physique au collégial et sont adaptés à la réalité de l'étudiant d'aujourd'hui. Actuelle, attrayante et ef cace, la facture visuelle des ouvrages facilite la compréhension de la matière. Les concepts abordés dans les chapitres sont du concret vers l'abstrait et les expli cations s'appuient sur des exemples réalistes. L'étudiant est guidé dans son apprentissage au moyen de notions théoriques rigoureusement présentées et d'une stratégie de résolution de problèmes appliquée dans les nombreux exemples résolus. Ces qualités pédagogiques permettront à l'étudiant de réussir ses cours de phy sique au collégial et de se distinguer à l'université. De plus, la collection est accompagnée de ressources exceptionnelles et inédites : • les solutionnaires détaillés des questions, exercices et problèmes ; • des problèmes synthèse conceptuels qui facilitent l'intégration de la matière vue dans différents chapitres ; • des de animés qui relient la matière du manuel à de nombreuses simulations interactives en ligne. Cette collection marque la véritable entrée des manuels de physique dans l'ère numérique, en béné ciant des multiples et incomparables avantages offerts par la plateforme Interactif. René Lafrance détient un doctorat en physique de l'Université McGill. Il est également titulaire d'un baccalauréat et d'une maîtrise en physique de l'Université Laval. Ses recherches ont porté sur la théorie quantique des champs sur réseau et sur la gravité quantique. Elles ont mené à la publication de plusieurs articles scienti ques. René Lafrance a aussi participé à l'édition française du réputé ouvrage d'Halliday, Resnick et Walker, paru chez Chenelière Éducation. Il a été professeur de physique à titre de coopérant à l'Université des sciences et des techniques de Masuku au Gabon. Il enseigne présentement la physique au Collège de BoisdeBoulogne. ISBN 978-2-7650-3546-6 www.cheneliere.ca/lafrance