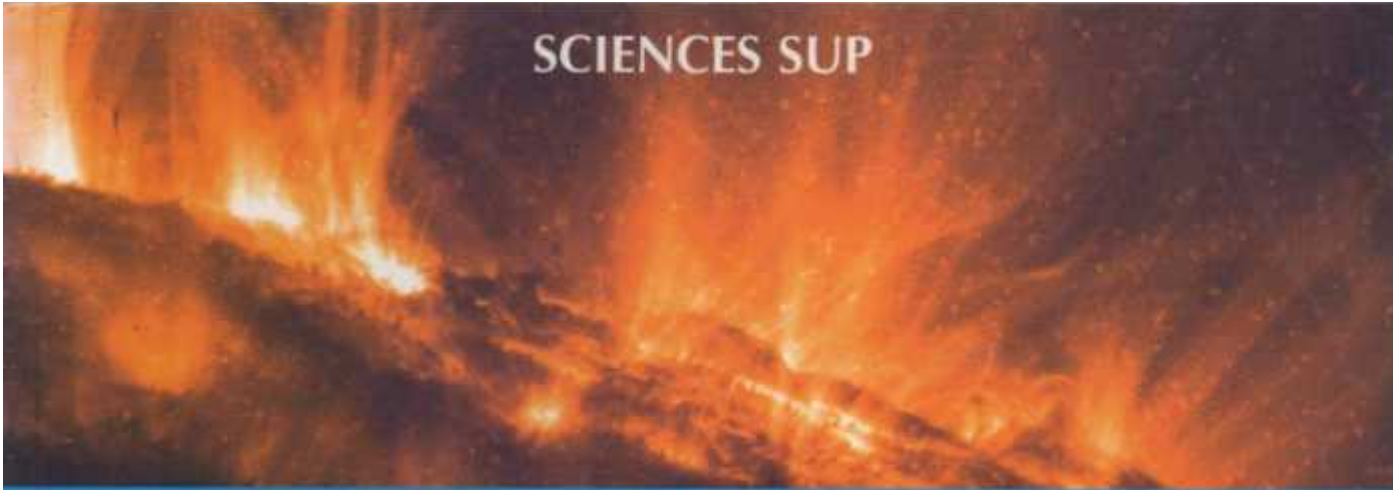




SCIENCES SUP

*Cours et exercices corrigés*

IUT • 1<sup>er</sup> Cycle • Licence

# LES PHÉNOMÈNES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

*Paul Lorrain  
Dale R. Corson  
François Lorrain*

DUNOD

# Table des matières

*Les astérisques indiquent les parties qui peuvent être omises sans perdre la cohérence d'ensemble.*

|                                                                                          |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| POUR COMMENCER                                                                           | XI   |
| AVANT-PROPOS                                                                             | XIII |
| POUR L'ENSEIGNANT                                                                        | XV   |
| LISTE DE SYMBOLES                                                                        | XVII |
| <b>CHAPITRE 1 • OPÉRATEURS VECTORIELS</b>                                                |      |
| 1.1 Algèbre vectorielle                                                                  | 2    |
| 1.2 Le gradient <b>grad</b> <i>f</i>                                                     | 3    |
| 1.3 Le flux                                                                              | 5    |
| 1.4 La divergence <b>div B</b>                                                           | 5    |
| 1.5 Le théorème de la divergence                                                         | 7    |
| 1.6 L'intégrale curviligne $\int_a^b \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$ . Champs conservatifs | 8    |
| 1.7 Le rotationnel <b>rot B</b>                                                          | 8    |
| 1.8 Le théorème de Stokes                                                                | 11   |
| 1.9 L'opérateur laplacien $\Delta$                                                       | 12   |
| 1.10 Scalaires et vecteurs en coordonnées sphériques                                     | 12   |
| 1.11 Résumé                                                                              | 16   |
| EXERCICES                                                                                | 18   |
| <b>CHAPITRE 2 • LA REPRÉSENTATION COMPLEXE</b>                                           |      |
| 2.1 Les nombres complexes                                                                | 22   |
| 2.2 La représentation complexe                                                           | 24   |
| 2.3 Usage de la représentation complexe                                                  | 26   |
| 2.4 Produit de variables en représentation complexe                                      | 27   |
| 2.5 Quotient de variables en représentation complexe                                     | 29   |
| 2.6 Vecteurs tournants                                                                   | 29   |
| 2.7 Notations                                                                            | 30   |
| 2.8 Résumé                                                                               | 30   |
| EXERCICES                                                                                | 31   |
| <b>CHAPITRE 3 • CHAMPS ÉLECTRIQUES : LOI DE COULOMB ET THÉORÈME DE GAUSS</b>             |      |
| 3.1 Le champ électrique <b>E</b>                                                         | 34   |
| 3.2 La loi de Coulomb                                                                    | 35   |

|                                                                                                                                 |                                                                                            |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3                                                                                                                             | Le principe de superposition                                                               | 36  |
| 3.4                                                                                                                             | Le potentiel électrique $V$ et le rotationnel de $\mathbf{E}$                              | 41  |
| 3.5                                                                                                                             | Le champ électrique à l'intérieur et à l'extérieur de corps macroscopiques                 | 46  |
| 3.6                                                                                                                             | Le théorème de Gauss                                                                       | 47  |
| 3.7                                                                                                                             | Résumé                                                                                     | 57  |
|                                                                                                                                 | EXERCICES                                                                                  | 58  |
| <b>CHAPITRE 4 • CHAMPS ÉLECTRIQUES : ÉQUATIONS DE POISSON ET DE LAPLACE.</b>                                                    |                                                                                            |     |
| <b>CIRCUITS ÉLECTRIQUES. CONDUCTION</b>                                                                                         |                                                                                            |     |
| 4.1                                                                                                                             | Les équations de Poisson et de Laplace                                                     | 67  |
| 4.2                                                                                                                             | Conservation de la charge électrique                                                       | 72  |
| 4.3                                                                                                                             | La loi d'Ohm                                                                               | 73  |
| 4.4                                                                                                                             | * Circuits électriques. Lois de Kirchhoff                                                  | 76  |
| 4.5                                                                                                                             | La conduction                                                                              | 78  |
| 4.6                                                                                                                             | Conducteurs isolés dans des champs statiques                                               | 82  |
| 4.7                                                                                                                             | Résumé                                                                                     | 83  |
|                                                                                                                                 | EXERCICES                                                                                  | 84  |
| <b>CHAPITRE 5 • CHAMPS ÉLECTRIQUES : LES MULTIPÔLES ÉLECTRIQUES</b>                                                             |                                                                                            |     |
| 5.1                                                                                                                             | Le dipôle électrique                                                                       | 89  |
| 5.2                                                                                                                             | * Le quadrupôle électrique linéaire                                                        | 92  |
| 5.3                                                                                                                             | * Les multipôles électriques                                                               | 94  |
| 5.4                                                                                                                             | * Le champ électrique à l'extérieur d'une distribution de charge, développée en multipôles | 95  |
| 5.5                                                                                                                             | * Résumé                                                                                   | 102 |
|                                                                                                                                 | EXERCICES                                                                                  | 103 |
| <b>CHAPITRE 6 • CHAMPS ÉLECTRIQUES : ÉNERGIE, CAPACITÉ ET FORCES</b>                                                            |                                                                                            |     |
| 6.1                                                                                                                             | Énergie potentielle en termes de charges $q$ et potentiel $V$                              | 107 |
| 6.2                                                                                                                             | Énergie potentielle en termes de champ électrique $\mathbf{E}$                             | 110 |
| 6.3                                                                                                                             | La capacité d'un conducteur isolé                                                          | 113 |
| 6.4                                                                                                                             | La capacité entre deux conducteurs                                                         | 114 |
| 6.5                                                                                                                             | * La constante de temps                                                                    | 116 |
| 6.6                                                                                                                             | * Le courant alternatif dans un condensateur                                               | 117 |
| 6.7                                                                                                                             | Forces électriques sur un conducteur                                                       | 119 |
| 6.8                                                                                                                             | Le calcul des forces électriques par la méthode du travail virtuel                         | 121 |
| 6.9                                                                                                                             | Résumé                                                                                     | 122 |
|                                                                                                                                 | EXERCICES                                                                                  | 123 |
| <b>CHAPITRE 7 • CHAMPS ÉLECTRIQUES : MATÉRIAUX DIÉLECTRIQUES, CHARGES LIÉES ET INDUCTION ÉLECTRIQUE <math>\mathbf{D}</math></b> |                                                                                            |     |
| 7.1                                                                                                                             | Les trois processus fondamentaux de polarisation                                           | 130 |
| 7.2                                                                                                                             | La polarisation électrique $\mathbf{P}$                                                    | 130 |
| 7.3                                                                                                                             | Charges libres et liées                                                                    | 130 |
| 7.4                                                                                                                             | Le champ électrique d'un diélectrique polarisé                                             | 133 |
| 7.5                                                                                                                             | Le théorème de Gauss dans les diélectriques                                                | 134 |
| 7.6                                                                                                                             | Les équations de Poisson et de Laplace pour $V$ dans les diélectriques                     | 135 |
| 7.7                                                                                                                             | L'induction électrique $\mathbf{D}$ . La divergence de $\mathbf{D}$                        | 135 |

|                                                                                                                             |                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.8                                                                                                                         | La susceptibilité diélectrique $\chi_e$                                                 | 137 |
| 7.9                                                                                                                         | La permittivité relative $\epsilon_r$                                                   | 137 |
| 7.10                                                                                                                        | La densité de courant de déplacement $\partial \mathbf{D} / \partial t$                 | 142 |
| 7.11                                                                                                                        | Résumé                                                                                  | 143 |
|                                                                                                                             | EXERCICES                                                                               | 145 |
| <b>CHAPITRE 8 • CHAMPS ÉLECTRIQUES : DIÉLECTRIQUES RÉELS, CONDITIONS DE CONTINUITÉ À UNE INTERFACE. ÉNERGIE EMMAGASINÉE</b> |                                                                                         |     |
| 8.1                                                                                                                         | * Les diélectriques réels                                                               | 149 |
| 8.2                                                                                                                         | Les conditions aux limites à une interface                                              | 154 |
| 8.3                                                                                                                         | L'énergie potentielle d'une distribution de charge en présence de diélectriques         | 157 |
| 8.4                                                                                                                         | Les forces électriques en présence de diélectriques                                     | 160 |
| 8.5                                                                                                                         | Résumé                                                                                  | 160 |
|                                                                                                                             | EXERCICES                                                                               | 161 |
| <b>CHAPITRE 9 • * CHAMPS ÉLECTRIQUES : LES IMAGES. L'ÉQUATION DE LAPLACE EN COORDONNÉES CARTÉSIENNES</b>                    |                                                                                         |     |
| 9.1                                                                                                                         | * Les images                                                                            | 167 |
| 9.2                                                                                                                         | * La résolution de l'équation de Laplace en coordonnées cartésiennes                    | 172 |
| 9.3                                                                                                                         | * Résolution de l'équation de Laplace avec un tableur                                   | 177 |
| 9.4                                                                                                                         | * Résumé                                                                                | 182 |
|                                                                                                                             | EXERCICES                                                                               | 182 |
| <b>CHAPITRE 10 • * CHAMPS ÉLECTRIQUES : L'ÉQUATION DE LAPLACE EN COORDONNÉES SPHÉRIQUES. L'ÉQUATION DE POISSON POUR E</b>   |                                                                                         |     |
| 10.1                                                                                                                        | * Résolution de l'équation de Laplace en coordonnées sphériques. L'équation de Legendre | 187 |
| 10.2                                                                                                                        | * L'équation de Poisson pour E dans des champs électrostatiques                         | 194 |
| 10.3                                                                                                                        | * Résumé                                                                                | 196 |
|                                                                                                                             | EXERCICES                                                                               | 197 |
| <b>CHAPITRE 11 • * RELATIVITÉ : LA TRANSFORMATION DE LORENTZ</b>                                                            |                                                                                         |     |
| 11.1                                                                                                                        | * Référentiels et observateurs                                                          | 200 |
| 11.2                                                                                                                        | * La transformation galiléenne                                                          | 201 |
| 11.3                                                                                                                        | * Le principe de relativité                                                             | 201 |
| 11.4                                                                                                                        | * La transformation de Lorentz                                                          | 202 |
| 11.5                                                                                                                        | * Transformation d'une longueur. La contraction de Lorentz                              | 205 |
| 11.6                                                                                                                        | * Transformation d'un intervalle de temps. Dilatation du temps                          | 206 |
| 11.7                                                                                                                        | * Transformation d'une vitesse                                                          | 209 |
| 11.8                                                                                                                        | * L'invariance de la charge électrique                                                  | 210 |
| 11.9                                                                                                                        | * Résumé                                                                                | 210 |
|                                                                                                                             | * EXERCICES                                                                             | 212 |
| <b>CHAPITRE 12 • * RELATIVITÉ : MASSE, IMPULSION, FORCE ET ÉNERGIE</b>                                                      |                                                                                         |     |
| 12.1                                                                                                                        | * La masse relativiste                                                                  | 217 |
| 12.2                                                                                                                        | * L'impulsion relativiste                                                               | 218 |
| 12.3                                                                                                                        | * La force relativiste                                                                  | 219 |
| 12.4                                                                                                                        | * L'énergie relativiste $\mathcal{E} = mc^2$                                            | 219 |

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 12.5 * Transformation d'une force                                                                               | 222 |
| 12.6 * Le photon                                                                                                | 223 |
| 12.7 * Résumé                                                                                                   | 223 |
| EXERCICES                                                                                                       | 225 |
| CHAPITRE 13 • * RELATIVITÉ : LES CHAMPS $E$ ET $B$ D'UNE CHARGE ÉLECTRIQUE EN MOUVEMENT                         |     |
| 13.1 * La force sur $q$                                                                                         | 229 |
| 13.2 * Champs électrique et magnétique                                                                          | 232 |
| 13.3 * La force sur $Q$                                                                                         | 238 |
| 13.4 * Transformation de $Q$ , $E$ , $B$ , $A$ et $V$                                                           | 239 |
| 13.5 * Résumé                                                                                                   | 242 |
| EXERCICES                                                                                                       | 243 |
| CHAPITRE 14 • CHAMPS MAGNÉTIQUES : L'INDUCTION MAGNÉTIQUE $B$<br>ET LE POTENTIEL VECTEUR $A$                    |     |
| 14.1 * Les monopôles magnétiques                                                                                | 245 |
| 14.2 L'induction magnétique $B$ . La loi de Biot et Savart                                                      | 246 |
| 14.3 La divergence de $B$                                                                                       | 254 |
| 14.4 Le potentiel vecteur $A$                                                                                   | 255 |
| 14.5 Résumé                                                                                                     | 261 |
| EXERCICES                                                                                                       | 262 |
| CHAPITRE 15 • CHAMPS MAGNÉTIQUES : LE POTENTIEL VECTEUR $A$ .<br>LE THÉORÈME DE LA CIRCULATION D'AMPÈRE         |     |
| 15.1 L'intégrale curviligne de $A \cdot d\mathbf{l}$ sur une courbe fermée                                      | 267 |
| 15.2 Le laplacien de $A$                                                                                        | 270 |
| 15.3 La divergence de $A$                                                                                       | 270 |
| 15.4 Le rotationnel de $B$ . Le théorème de la circulation d'Ampère                                             | 271 |
| 15.5 Résumé                                                                                                     | 275 |
| EXERCICES                                                                                                       | 275 |
| CHAPITRE 16 • * CHAMPS MAGNÉTIQUES : MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES                                                      |     |
| 16.1 * Les différents types de matériaux magnétiques                                                            | 279 |
| 16.2 * Les courants équivalents. La loi de Biot et Savart revisitée. La divergence de $B$                       | 281 |
| 16.3 * Le champ magnétique $H$ . Le rotationnel de $H$ . Le théorème de la circulation d'Ampère revu et corrigé | 283 |
| 16.4 * La susceptibilité magnétique $\chi_m$ et la perméabilité relative $\mu_r$                                | 285 |
| 16.5 * Les conditions aux limites pour $B$ et $H$                                                               | 286 |
| 16.6 * $B$ en fonction de $H$ dans les matériaux ferromagnétiques                                               | 288 |
| 16.7 * Le barreau aimanté                                                                                       | 290 |
| 16.8 * Résumé                                                                                                   | 292 |
| EXERCICES                                                                                                       | 293 |
| CHAPITRE 17 • CHAMPS MAGNÉTIQUES : FORCES MAGNÉTIQUES SUR DES CHARGES<br>ET DES COURANTS                        |     |
| 17.1 La force de Lorentz                                                                                        | 299 |
| 17.2 La force magnétique sur un fil parcouru par un courant                                                     | 307 |

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 17.3 La force magnétique entre deux circuits fermés                                                                   | 307 |
| 17.4 La force magnétique sur une distribution volumique de courant                                                    | 310 |
| 17.5 La loi d'Ohm pour des conducteurs en mouvement                                                                   | 312 |
| 17.6 Charges électrostatiques de volume à l'intérieur de conducteurs en mouvement dans des champs magnétiques         | 322 |
| 17.7 Résumé                                                                                                           | 323 |
| EXERCICES                                                                                                             | 324 |
| <b>CHAPITRE 18 • CHAMPS MAGNÉTIQUES : LA LOI DE L'INDUCTION DE FARADAY</b>                                            |     |
| 18.1 La loi de l'induction de Faraday pour les champs $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ . Force électromotrice induite   | 333 |
| 18.2 La loi d'induction de Faraday pour des $\mathbf{B}$ variables. Le rotationnel de $\mathbf{E}$                    | 339 |
| 18.3 Le champ électrique $\mathbf{E}$ exprimé en termes des potentiels $V$ et $\mathbf{A}$                            | 341 |
| 18.4 Les champs $\mathbf{E}$ , $-\text{grad } V$ , $-\partial\mathbf{A}/\partial t$ et $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ | 345 |
| 18.5 * Lien entre les deux formes de la loi de l'induction de Faraday                                                 | 346 |
| 18.6 Cinq équations clefs                                                                                             | 348 |
| 18.7 Résumé                                                                                                           | 348 |
| EXERCICES                                                                                                             | 349 |
| <b>CHAPITRE 19 • * CHAMPS MAGNÉTIQUES : INDUCTANCES PROPRE ET MUTUELLE</b>                                            |     |
| 19.1 * L'inductance mutuelle $M$                                                                                      | 357 |
| 19.2 * L'inductance propre $L$                                                                                        | 360 |
| 19.3 * Constante de temps et impédance $Z$ d'une bobine à inductance                                                  | 362 |
| 19.4 * Résumé                                                                                                         | 363 |
| EXERCICES                                                                                                             | 364 |
| <b>CHAPITRE 20 • CHAMPS MAGNÉTIQUES : ÉNERGIE MAGNÉTIQUE ET FORCES MAGNÉTIQUES MACROSCOPIQUES</b>                     |     |
| 20.1 Emmagasinement d'énergie dans un circuit inductif                                                                | 371 |
| 20.2 Densité d'énergie magnétique                                                                                     | 374 |
| 20.3 Inductance propre d'une distribution volumique de courant                                                        | 376 |
| 20.4 Force et couple entre deux circuits parcourus par du courant                                                     | 377 |
| 20.5 Pression magnétique                                                                                              | 382 |
| 20.6 Forces magnétiques sur des conducteurs en mouvement dans des champs magnétiques                                  | 384 |
| 20.7 Résumé                                                                                                           | 384 |
| EXERCICES                                                                                                             | 385 |
| <b>CHAPITRE 21 • LES ÉQUATIONS DE MAXWELL</b>                                                                         |     |
| 21.1 L'équation pour le rotationnel de $\mathbf{B}$                                                                   | 391 |
| 21.2 Les équations de Maxwell sous forme locale                                                                       | 392 |
| 21.3 Les équations de Maxwell sous forme intégrale                                                                    | 393 |
| 21.4 La loi de conservation de la charge                                                                              | 396 |
| 21.5 Les équations de Maxwell sont redondantes !                                                                      | 396 |
| 21.6 La dualité                                                                                                       | 397 |
| 21.7 La condition de Lorentz                                                                                          | 398 |
| 21.8 Résumé                                                                                                           | 399 |
| EXERCICES                                                                                                             | 400 |

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>CHAPITRE 22 • ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES : DANS LE VIDE, LES ISOLANTS ET LES CONDUCTEURS</b>         |     |
| 22.1 Le spectre électromagnétique                                                                     | 407 |
| 22.2 Les ondes                                                                                        | 409 |
| 22.3 Les ondes électromagnétiques dans le vide                                                        | 411 |
| 22.4 Le théorème de Poynting                                                                          | 415 |
| 22.5 Les ondes électromagnétiques dans les isolants                                                   | 416 |
| 22.6 Les ondes électromagnétiques dans les conducteurs                                                | 418 |
| 22.7 Résumé                                                                                           | 421 |
| EXERCICES                                                                                             | 423 |
| <b>CHAPITRE 23 • ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES : RÉFLEXION ET RÉFRACTION</b>                               |     |
| 23.1 Les lois de Descartes pour la réflexion et la réfraction                                         | 431 |
| 23.2 Les équations de Fresnel                                                                         | 433 |
| 23.3 Réflexion et réfraction à l'interface entre deux isolants                                        | 435 |
| 23.4 Réflexion et réfraction sur la surface d'un bon conducteur                                       | 444 |
| 23.5 Résumé                                                                                           | 446 |
| EXERCICES                                                                                             | 447 |
| <b>CHAPITRE 24 • ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES : ONDES GUIDÉES</b>                                         |     |
| 24.1 Les câbles à fils parallèles                                                                     | 451 |
| 24.2 Les câbles coaxiaux                                                                              | 452 |
| 24.3 Les lignes microruban                                                                            | 455 |
| 24.4 Les guides d'onde métalliques creux                                                              | 457 |
| 24.5 Les guides d'onde optiques                                                                       | 461 |
| 24.6 Résumé                                                                                           | 466 |
| EXERCICES                                                                                             | 467 |
| <b>CHAPITRE 25 • LE RAYONNEMENT D'UN DIPÔLE ÉLECTRIQUE. ANTENNES</b>                                  |     |
| 25.1 Le rayonnement d'un dipôle électrique                                                            | 470 |
| 25.2 Les antennes                                                                                     | 482 |
| 25.3 Les antennes quart d'onde et demi-onde                                                           | 484 |
| 25.4 Réseaux d'antennes                                                                               | 487 |
| 25.5 Résumé                                                                                           | 492 |
| EXERCICES                                                                                             | 492 |
| <b>ANNEXE A • PRÉFIXES ET SYMBOLES DU SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS (SI)</b>                         | 497 |
| <b>ANNEXE B • TABLE DE CONVERSION SI-CGS</b>                                                          | 498 |
| <b>ANNEXE C • HISTOIRE DES ÉQUATIONS DE « MAXWELL »</b>                                               | 499 |
| <b>ANNEXE D • CHAMPS ET POTENTIELS RETARDÉS</b>                                                       | 501 |
| <b>ANNEXE E • DÉFINITIONS ET IDENTITÉS VECTORIELLES, CONSTANTES PHYSIQUES ET ÉQUATIONS DE MAXWELL</b> | 503 |
| <b>RÉPONSES</b>                                                                                       | 509 |
| <b>BIBLIOGRAPHIE</b>                                                                                  | 513 |
| <b>INDEX</b>                                                                                          | 517 |