

Électronique

Fondements et applications

Avec 250 exercices et problèmes résolus

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Électronique

Fondements et applications

Avec 250 exercices et problèmes résolus

2^e édition

José-Philippe PÉREZ

Professeur émérite à l'université Paul-Sabatier de Toulouse

Christophe LAGOUTE

Professeur au lycée Bellevue de Toulouse

Jean-Yves FOURNIOLS

Professeur à l'INSA de Toulouse

Stéphane BOUHOURS

Professeur au lycée Pierre de Fermat de Toulouse

DUNOD

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage. Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements	d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).
--	--



© Dunod, Paris, 2006, 2012 pour la nouvelle édition
ISBN 978-2-10-058115-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Avant-propos	x
Les grands noms de l'électronique	xii
Constantes physiques, notations et symboles	xviii
Description de l'ouvrage	xxii
L'électronique en vingt questions	xxv
Introduction expérimentale : Oscilloscopes et multimètres	xxvii
I. — Signaux	xxvii
II. — L'oscilloscope	xxix
III. — Les multimètres	xxxv
1. Lois de base des circuits en régime stationnaire	
I. — Dipôles en régime stationnaire	2
II. — Différents types de dipôles	7
III. — Lois de Kirchhoff en régime stationnaire	15
IV. — Associations de dipôles	22
V. — Aspects énergétiques en régime stationnaire	29
<i>Exercices et problèmes</i>	33
2. Lois de base des circuits en régime quasi stationnaire	
I. — Lois de Kirchhoff en régime quasi stationnaire	41
II. — Signal sinusoïdal en notation complexe	44
III. — Lois de base en régime sinusoïdal	51
IV. — Puissance en régime sinusoïdal	55
V. — Circuits électriques en triphasé	64
VI. — Distribution d'électricité et problèmes de sécurité	71
<i>Exercices et problèmes</i>	76
3. Oscillations électriques harmoniques, amorties, forcées. Résonance	
I. — Oscillateur harmonique en électricité	84
II. — Oscillateurs amortis par un élément résistif	87
III. — Oscillations électriques forcées. Résonance	93
IV. — Amplitude de l'entrée indépendante de la pulsation	98
V. — Circuit résonnant parallèle	104
<i>Exercices et problèmes</i>	108

4. Régimes transitoires

I. — Étude expérimentale	113
II. — Établissement d'un régime stationnaire	116
III. — Établissement d'un régime variable	134
IV. — Applications	136
V. — Utilisation de la transformation de Laplace	139
<i>Exercices et problèmes</i>	143

5. Théorèmes de base dans l'analyse des réseaux linéaires

I. — Théorèmes de base	149
II. — Cas des sources commandées	160
III. — Analyse des réseaux	164
IV. — Utilisation de la transformée de Laplace	170
<i>Exercices et problèmes</i>	175

6. Fonctions de transfert. Quadripôles

I. — Systèmes électroniques linéaires	180
II. — Quadripôles et filtres passifs	185
III. — Association en cascade de filtres passifs	194
IV. — Caractéristiques des quadripôles	198
<i>Exercices et problèmes</i>	203

7. Composants électroniques

I. — Résistors, condensateurs et quartz	210
II. — Bobines et transformateurs	216
III. — Diodes semiconductrices et thyristors	222
IV. — Piles et accumulateurs	231
V. — Transistors bipolaires	232
VI. — Transistors à effet de champ	243
<i>Exercices et problèmes</i>	252

8. Amplificateur opérationnel : montages de base

I. — Description et représentation de l'AO	257
II. — Électronique non linéaire avec AO	263
III. — Électronique linéaire à base d'AO	270
IV. — Réalisation d'impédances à l'aide d'AO	286
V. — Imperfections de l'AO en régime variable	288
<i>Exercices et problèmes</i>	295

9. Amplificateur opérationnel : compléments

I. — Amplificateur à très fort gain	302
II. — Amplificateur d'instrumentation	305
III. — Montages à rétroaction négative avec diodes	306
IV. — Influence des imperfections de l'AO	314
<i>Exercices et problèmes</i>	319

10. Filtres actifs

I. — Propriétés des filtres actifs	326
II. — Filtres actifs d'ordre deux	332
III. — Synthèse de filtres	339
<i>Exercices et problèmes</i>	346

11. Oscillations couplées en électricité

I. — Circuits couplés en régime libre	353
II. — Modes propres ou normaux de vibration	360
III. — Modes de couplage	367
IV. — Système de deux circuits couplés en régime forcé	368
V. — Couplage entre plusieurs oscillateurs	371
<i>Exercices et problèmes</i>	376

12. Effets non linéaires en électronique

I. — Systèmes non linéaires	380
II. — Transfert non linéaire	389
III. — Génération d'harmoniques	398
IV. — Effets non linéaires sur un oscillateur	405
<i>Exercices et problèmes</i>	421

13. Rétroaction. Application aux asservissements

I. — Rétroaction	428
II. — Rétroaction négative	432
III. — Analyse en électronique et en automatique	436
IV. — Stabilité des systèmes à rétroaction négative	438
V. — Réalisation de la rétroaction négative	444
VI. — Applications physiques des asservissements	447
<i>Exercices et problèmes</i>	453

14. Oscillateurs électriques

I. — Différents types d'oscillateurs	459
II. — Oscillateurs quasi sinusoïdaux	463
III. — Oscillateurs de relaxation	475
IV. — Applications	481
<i>Exercices et problèmes</i>	485

15. Signaux déterministes

I. — Rappels sur les systèmes linéaires	491
II. — Systèmes causaux	496
III. — Propriétés énergétiques des signaux	500
IV. — Numérisation des signaux	503
<i>Exercices et problèmes</i>	508

16. Modulation et démodulation

I. — Chaîne de transmission	513
II. — Modulation et démodulation d'amplitude	514
III. — Modulation d'argument ou angulaire	526
IV. — Modulation et démodulation spatiales en optique	532
<i>Exercices et problèmes</i>	538

17. Signaux aléatoires et bruits

I. — Statistique des signaux aléatoires	542
II. — Différents types de bruit	545
III. — Bruit dans les systèmes	551
IV. — Bruit dans les composants	557
<i>Exercices et problèmes</i>	563

18. Notions d'électronique numérique

I. — Numération et algèbre binaires	569
II. — Opérateurs logiques	575
III. — Technologie des portes logiques	589
IV. — Applications	594
<i>Exercices et problèmes</i>	599

19. Conversions analogique-numérique

I. — Conversion analogique numérique ou CAN	604
II. — Conversion numérique analogique ou CNA	619
<i>Exercices et problèmes</i>	625

20. Théorie de la communication de Shannon

I. — Information manquante associée à une source	629
II. — Information mutuelle de deux sources	636
III. — Canaux de transmission	645
<i>Exercices et problèmes</i>	654

Annexe 1. Outils mathématiques de base 660

I. — Rappels de trigonométrie	660
II. — Fonctions hyperboliques	661
III. — Développement limités au voisinage de zéro	663
IV. — Nombres complexes	665
V. — Matrices	667
VI. — Équations différentielles	672

Annexe 2. Analyse de Fourier 676

I. — Séries de Fourier de fonctions périodiques	676
II. — Transformation de Fourier	680
III. — Transformée de Fourier numérique	691

Annexe 3. Transformée de Laplace	697
I. — Définition et propriétés	697
II. — Signaux électroniques usuels	704
Annexe 4. Fonction Gamma et fonctions de Bessel	708
I. — Fonction gamma	708
II. — Fonctions de Bessel	710
Annexe 5. Loïs de probabilité	713
I. — Langage des probabilités	713
II. — Théorie des probabilités	714
III. — Variables aléatoires	715
IV. — Différentes lois de probabilité	718
Annexe 6. Simulation des circuits	724
I. — Simulations SPICE	724
II. — Conception d'un conformateur sinusoïdal	727
III. — Oscillateur à comportement chaotique	734
Réponses aux vingt questions	746
Solutions des exercices et problèmes	749
Glossaire	852
Bibliographie	854
Index	857

La culture doit rester au-dessus de toute technique, mais elle doit incorporer à son contenu la connaissance et l'intuition des schèmes véritables des techniques.

Gilbert Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques*,
Paris, Aubier, 1958, page 227.

Avant-propos

Ce cours, intitulé *Électronique, fondements et applications*, correspond globalement à l'enseignement des circuits électriques et de l'électronique donné en licence et master de physique (L1, L2, L3, M1) de l'Université Paul Sabatier, et en Classes Préparatoires aux Grandes Écoles scientifiques (CPGE) pour les parties élémentaires.

Comme pour les autres ouvrages de la même collection de physique « Fondements et applications », il nous a paru intéressant de le découper en leçons progressives et quasi autonomes. On peut y distinguer trois groupes de leçons.

Dans le *premier*, on trouve les thèmes classiquement étudiés en première année L1, ou première année des CPGE, c'est-à-dire les lois de base appliquées aux circuits, en relation avec l'électromagnétisme ; il s'agit précisément des lois de Kirchhoff en régime stationnaire, en régime quasi stationnaire, des oscillations électriques forcées, de la résonance, des régimes transitoires, des théorèmes fondamentaux des circuits linéaires (de Thévenin, de Norton, etc.) et des fonctions de transfert des circuits passifs.

Dans le *deuxième*, les thèmes sont ceux couramment enseignés en deuxième année L2 de la licence de physique et en deuxième année des CPGE. On y développe les composants, les amplificateurs opérationnels, les filtres actifs, les oscillateurs couplés et la rétroaction.

Enfin, dans le *troisième* groupe, on a rassemblé tous les thèmes généralement étudiés en troisième et dernière année L3 de la licence, voire en master, c'est-à-dire les effets non linéaires dans les circuits, les oscillateurs électriques sinusoïdaux et de relaxation, les signaux déterministes, la modulation et la démodulation. En outre, on y trouve des thèmes exigés dans des formations spécialisées ou approfondies, notamment à la préparation à l'agrégation de physique, précisément l'électronique logique et numérique, la conversion analogique-numérique, le bruit et la théorie de la communication de Shannon.

Cette troisième partie rend incontestablement les objectifs de l'ouvrage ambitieux. Cependant, elle nous a semblé indispensable pour éviter qu'un ouvrage publié aujourd'hui sous le nom *Électronique* n'apparaisse pas trop éloigné des préoccupations actuelles dans ce domaine.

Nous avons tenté de rendre compatible le respect des programmes d'enseignement de la nouvelle licence de physique en trois ans et la nécessaire actualisation de l'électronique. Mises à part l'organisation

en leçons quasi autonomes (le renvoi à des formules éloignées est pratiquement inexistant), l'illustration par de nombreux exemples numériques et la volonté de ne proposer qu'*un seul* ouvrage, cet effort a notamment porté sur les points suivants :

i) L'analyse physique des lois des circuits et la démonstration de tous les théorèmes dérivés (Millman, Thévenin, Boucherot), le plus souvent à partir des publications originales ; on a ainsi volontairement rompu avec le point de vue des adeptes de la pédagogie du seul *savoir-faire*.

ii) La volonté de considérer l'électronique comme un excellent et efficace développement de la physique, et non comme une spécialité autonome, peu rigoureuse, n'exigeant qu'un enseignement pratique.

L'ouvrage s'adresse principalement aux étudiants : il doit donc être clair, efficace, peu coûteux, et ne pas être un formulaire « sans physique » ou un recueil d'exercices calculatoires « sans intérêt ». Les exercices proposés à la fin des chapitres décrivent des situations physiques concrètes. Leurs solutions suffisamment détaillées, données à la fin de l'ouvrage, ou sur le site web :

<http://www.ast.obs-mip.fr/perez>

permettront à l'étudiant, et plus largement à l'autodidacte, de tester sa propre compréhension du cours, de prolonger sa réflexion et de développer son autonomie. Nous pensons ainsi avoir rassemblé, dans un seul livre, les éléments indispensables à l'acquisition d'un savoir et d'un savoir-faire en électronique.

Ce livre doit beaucoup aux étudiants de la licence de physique, des Classes Préparatoires aux Grandes Écoles, de l'INSA de Toulouse, aux agrégatifs de physique, ainsi qu'à tous nos collègues enseignants. Nous les remercions pour leurs remarques et commentaires constructifs.

Les auteurs, Mai 2006

Les grands noms de l'électronique

André Marie Ampère

Physicien français, né à Lyon en 1775 et mort à Marseille en 1836. À la fois mathématicien, mécanicien, chimiste, il enseigne également la philosophie à la faculté des lettres de Paris. Ses principales découvertes concernent l'électricité : loi des actions électrodynamiques, hypothèse des courants dans la matière ; on lui doit les termes de courant et tension pour désigner ces grandeurs électriques. Il devient membre de l'Académie des Sciences en 1814, puis professeur au Collège de France en 1824.

John Bardeen

Physicien américain, né à Madison en 1908 et mort à Boston en 1991. Il contribue de façon décisive à l'essor de deux grands domaines au milieu du XX^e siècle : les semiconducteurs et la supraconductivité, ce qui lui valut *deux* prix Nobel de physique, le premier en 1956 pour la mise au point du transistor à germanium avec W. Brattain et W. Shockley, et le second en 1972 qu'il partage avec L. Cooper et J. Schrieffer pour la théorie de la supraconductivité dite désormais BCS en hommage à ses auteurs.

Heinrich Georg Barkhausen

Ingénieur allemand, né à Brême en 1881 et mort à Dresde en 1956. Après des études d'ingénieur, il est nommé en 1911 professeur de physique à l'université de Dresde. Il est connu en électronique pour avoir produit, avec son collègue K. Kurz, des micro-ondes en faisant osciller le courant dans une triode à vide. En physique, il a étudié et mis en évidence, par voie acoustique, le processus d'aimantation des corps ferromagnétiques (cf. *Électromagnétisme*).

Alexander Graham Bell

Physicien et inventeur américain, d'origine écossaise, né à Edimbourg en 1847 et mort au Canada, près de Baddeck, en 1922. Après un travail sur la phonétique et sur le langage des signes pour les sourds-muets, il devient professeur de physiologie vocale à Boston et met au point une oreille artificielle, ce qui le conduit naturellement à l'invention du téléphone en 1876. Cette invention lui rapporte une fortune qu'il consacre à des actions humanitaires et à des projets scientifiques dans lesquels il fait preuve de capacités inventives exceptionnelles.

Hendrik W. Bode

Électronicien américain, né à Madison dans le Wisconsin en 1905 et mort à Madison en 1982. Dès 1926, il entre au laboratoire de la compagnie Bell Telephon ; il passe sa thèse en 1935 à l'Université de Colombia. Il est notamment l'auteur d'un ouvrage sur les circuits linéaires électriques qu'il décrit à l'aide de deux graphes donnant le module et la phase du facteur d'amplification des circuits en fonction de la fréquence.

Paul Boucherot

Ingénieur français, né en 1869 et mort en 1943. Il est connu pour ses travaux sur la distribution de puissance électrique dans les circuits et réseaux électriques, notamment pour le théorème qu'il énonce pour la première fois au Congrès International de l'Électricité en 1900 : dans un circuit, la somme des puissances actives et la somme des puissances réactives sont nulles (cf. chapitre 2).

Édouard Branly

Physicien français, né à Amiens en 1844 et mort à Paris en 1940. À la sortie de l'École Normale Supérieure, il exerce des fonctions de professeur de lycée. Après sa thèse en 1873, où il fait preuve de grandes qualités expérimentales, il est nommé Directeur adjoint du laboratoire de Physique de la Sorbonne. Catholique convaincu, il devient professeur de l'Institut Catholique de Paris en 1875. Il est surtout connu pour le détecteur d'ondes électromagnétiques, le radioconducteur ou cohéreur à limaille, qu'il invente en 1890 ; ce dispositif est un tube isolant en verre, rempli de limaille de nickel et d'argent, dont la résistance entre ses extrémités en laiton varie sous l'action des ondes électromagnétiques. Ce système fut utilisé par Marconi pour réaliser des liaisons par ondes électromagnétiques sur de grandes distances.

Walter Brattain

Physicien américain, né à Amoy, en Chine, en 1902 et mort à Seattle en 1985. Après ses études universitaires, il est recruté par la compagnie Bell Telephone, principalement pour effectuer un travail expérimental. C'est là qu'il rejoint l'équipe de W. Shockley, où se trouve le physicien théoricien J. Bardeen, et qu'il montre des qualités exceptionnelles d'expérimentateur. Cette collaboration à trois aboutit, en 1948, à l'invention du transistor, ce qui leur valut le prix Nobel en 1956.

Thomas Edison

Expérimentateur américain de génie, né à Milan (dans l'Ohio) en 1847 et mort à West Orange (New Jersey) en 1931. Très jeune (à 17 ans), il réalise un télégraphe bidirectionnel alors qu'il n'est qu'un simple opérateur télégraphiste. Il invente ensuite le phonographe, perfectionne la lampe à incandescence et développe la production et le transport de puissance électrique. En industriel habile, il met en œuvre l'électrification de New-York. Cependant, il se fâche avec son ingénieur Nicolas Tesla, lequel tente en vain de le convaincre des avantages techniques du courant alternatif. On retient principalement d'Edison qu'il est le premier des scientifiques à avoir su développer une exploitation industrielle de ses propres découvertes scientifiques.

Michael Faraday

Physicien et chimiste anglais, né à Southwark en 1791 et mort à Hampton Court en 1867. Garçon de courses chez un bibliothécaire, il devient autodidacte en lisant de nombreux ouvrages scientifiques, notamment de chimie. Employé dans un laboratoire de chimie comme apprenti, il se révèle rapidement expérimentateur de génie. Il devient alors directeur du laboratoire et professeur de chimie. Ses contributions remarquables furent d'abord l'énoncé des lois de l'électrochimie et la découverte du benzène en 1824. En 1854, il énonce la célèbre loi de l'induction puis la nature discontinue de la charge électrique et la propriété de cette dernière d'être conservative, c'est-à-dire de ne pouvoir être ni créée ni détruite.

John Fleming

Ingénieur électricien anglais, né à Lancaster (au nord-ouest de Leeds) en 1849 et mort à Sidmouth (dans le sud-ouest de l'Angleterre) en 1945. Après ses études d'ingénieur, J. Fleming entre au laboratoire Cavendish dirigé par Maxwell et devient professeur. Il est connu pour avoir inventé la diode à vide,

constituée d'une cathode, qui émet des électrons lorsqu'elle est chauffée (effet thermoélectronique découvert par Edison), et d'une anode qui les recueille. Son but était de mettre au point un dispositif de détection des ondes radioélectriques. Il déposa un brevet sur la diode en 1904. Sur un plan pédagogique, c'est lui qui propose la règle des trois doigts de la main droite, équivalente à celle du bonhomme d'Ampère.

Lee de Forest

Ingénieur américain, né à Council Bluffs dans l'Iowa en 1873 et mort à Hollywood en Californie en 1961. Il invente la triode à vide en ajoutant, entre les deux électrodes de la diode de Fleming, une troisième électrode, appelée grille. Cette dernière permet de commander le courant du circuit anode, ce qui est à la base des tubes à vide amplificateurs de tension.

Joseph Fourier

Mathématicien et physicien français, né à Auxerre en 1768 et mort à Paris en 1830. Alors qu'il est préfet de l'Isère, il remporte le prix de l'Académie des Sciences pour son traitement mathématique de la diffusion thermique, à l'aide des séries trigonométriques. Il est le premier à avoir souligné le caractère fondamentalement irréversible de la diffusion thermique. La décomposition d'un signal variable en ses composantes sinusoïdales est devenue essentielle dans toutes les branches de la physique ; elle est aujourd'hui connue sous le nom d'analyse de Fourier.

Joseph Henry

Physicien américain, né à Albany en 1797 et mort à Washington en 1878. Spécialiste d'électromagnétisme, il découvre en 1832 l'auto-induction. On a donné son nom à l'unité internationale d'inductance.

Oliver Heaviside

Physicien britannique, né à Londres en 1850 et mort à Torquay (station balnéaire anglaise) en 1925. Il dut quitter l'école en raison d'une surdité précoce ; aussi est-ce en autodidacte qu'il publie quelques contributions en électricité, dont la plus importante, la formulation vectorielle des équations de Maxwell. En 1902, il prédit l'existence de couches conductrices, dans l'ionosphère, lesquelles permettent d'expliquer la propagation des ondes radioélectriques entre des points distants sur la Terre, grâce à la réflexion sur ces couches. C'est lui qui a introduit, en électricité, la « fonction échelon » ; aussi cette dernière est-elle, à juste titre, appelée souvent fonction d'Heaviside.

Heinrich Hertz

Physicien allemand, né à Hamburg en 1857 et mort à Bonn en 1894. Il démontre en 1877 l'existence des ondes électromagnétiques, prévues par Maxwell, et fonde le domaine des télécommunications.

John Bertrand Johnson

Ingénieur américain d'origine suédoise, né en 1887 et mort en 1970. Employé des laboratoires de la compagnie Bell Telephon, il découvre en 1927 le bruit de la tension aux bornes d'un conducteur ohmique, lequel fut interprété par H. Nyquist. C'est à lui aussi que l'on doit la découverte en 1925 du bruit en $1/f$.

James Joule

Physicien anglais, né à Salford (près de Manchester) en 1818 et mort à Manchester en 1889. Expérimentateur de génie, il fait connaître les idées de von Mayer en étudiant les conversions énergétiques thermoélectriques (effet Joule) et thermomécanique (équivalent mécanique de la calorie).

Arthur Edwin Kennely

Électronicien américain, né en 1861 à Coloba, près de Bombay, et mort à Boston en 1939. Entré comme simple opérateur télégraphiste à l'Eastern Telegraph, il devient le principal assistant de Thomas Edison. En 1902, il est nommé professeur d'électrotechnique à Harvard. Ses travaux concernent surtout l'électrotechnique théorique. Il a donné son nom à un théorème sur l'équivalence des systèmes de conducteurs disposés en étoile et en triangle, équivalence précieuse dans la distribution de puissance électrique.

Gustav Robert Kirchhoff

Physicien allemand, né à Kœnisberg en 1824 et mort à Berlin en 1887. Il est surtout connu pour ses travaux en électricité, précisément pour les lois des courants dérivés, qu'il établit en 1845 (à 21 ans !) et qui depuis portent son nom. On lui attribue aussi l'établissement de l'équation des télégraphistes. Après sa thèse en 1847, il devient professeur à l'Université de Breslau. C'est là qu'il collabore avec Robert Bunsen sur la théorie du corps noir. La construction d'un spectroscope lui permet de découvrir le césium et le rubidium en 1860.

Pierre-Simon de Laplace

Astronome, mathématicien et physicien français, né à Beaumont-en-Auge en 1749 et mort à Paris en 1827. Bien que professeur de mathématiques et homme politique, ses travaux en physique sont nombreux. Il signe diverses contributions sur la capillarité, la propagation du son dans l'air, l'évolution adiabatique des gaz et le travail des forces électromagnétiques. Cependant, c'est sa publication sur la mécanique céleste, *Exposition du système du monde*, qui est la plus remarquée. On y trouve développée notamment les fondements d'une physique totalement déterminisme.

Guglielmo Marconi

Physicien italien, né à Bologne en 1874 et mort à Rome en 1937. Passionné très tôt par l'expérimentation en physique, mais peu intéressé par des études universitaires, Marconi tente de réaliser, dans la propriété familiale, un oscillateur capable de transmettre des informations à distance par voie hertzienne. Il y parvient en 1895, en s'appuyant sur les travaux de Hertz et de Branly notamment. N'étant pas soutenu par les autorités de son pays, il poursuit avec succès ses travaux en Angleterre ; en 1901, il parvient à réaliser une transmission radio entre Cornouailles en Angleterre et Terre-Neuve. Il reçoit le prix Nobel en 1909. Tout en améliorant la transmission hertzienne sur le plan technique, il oriente son activité vers la réalisation industrielle et vers la création d'émissions radiophoniques. C'est ainsi qu'il participe à la fondation de la BBC en Angleterre.

James Clerk Maxwell

Physicien britannique, né en 1831 en Écosse à Dumfriesshire et mort à Cambridge en 1879. En 1857 il publie un article sur la constitution probable des anneaux de Saturne, ce qui le fait connaître de la communauté scientifique et l'incite à s'intéresser au système constitué d'un grand nombre de particules. Il établit alors les principaux résultats de la théorie cinétique des gaz. C'est ensuite comme professeur d'université au King's College de Londres qu'il travaille sur l'électromagnétisme, chez lui, assisté par son épouse. Il est ensuite nommé à Cambridge pour diriger la construction du célèbre Cavendish Laboratory.

Jacob Millman

Électronicien américain d'origine russe, né en 1911 et mort à Boston en 1988. Diplômé du MIT (Massachusetts Institute of Technology), il devint professeur d'ingénierie électrique à l'Université Colombia. Tout au long de sa carrière, entre 1941 et 1987, il écrivit plusieurs livres d'électronique. Il est surtout connu pour avoir établi le théorème qui porte son nom, dans lequel la loi des nœuds est exprimée en fonction des tensions.

Edward Lawry Norton

Ingénieur électronicien américain, né à Rockland (Maine, USA) en 1898 et mort à Chatham (New Jersey, USA) en 1983. Il travailla durant toute sa carrière, pendant quarante et un ans, jusqu'en 1963, aux laboratoires de la compagnie Bell Telephon. C'est en 1945 qu'il établit un théorème, analogue au théorème de Thévenin, dans lequel les sources de tension sont remplacées par des sources de courant. Curieusement, il ne publia que trois articles dont aucun ne mentionne ce théorème. Ce dernier ne figure que dans un rapport technique de 1926.

Harry Nyquist

Ingénieur américain des laboratoires Bell Telephon, né en Suède en 1889 et mort à Harlingen aux Pays-Bas en 1976. C'est lui qui, dès 1930, introduit le concept de rétroaction négative sur les amplificateurs. Il participe activement au développement des asservissements pendant la seconde guerre mondiale. Il est surtout connu pour ses travaux sur les critères de stabilité des systèmes à rétroaction. En outre, il interprète le bruit de tension aux bornes d'un conducteur ohmique, découvert par Johnson.

Georg Simon Ohm

Physicien allemand, né à Erlangen en 1789 et mort à Munich en 1854. Alors qu'il est professeur au collège de guerre de Berlin, il découvre la loi sur les circuits linéaires entre tension et courant, qu'il publie en 1827 dans son ouvrage *Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet*. En 1849, il devient professeur de physique à l'Université de Munich. On a donné son nom à l'unité internationale de résistance.

Claude Shannon

Ingénieur américain, né à Gaylord (Michigan) en 1916 et mort des suites de la maladie d'Alzheimer à Medford (Massachusetts) en février 2001. Durant ses études au MIT (Massachusetts Institute of Technology), il prouve que les règles de l'algèbre de Boole peuvent être appliquées à de simples circuits électriques, un relais ouvert étant associé au chiffre 1 et un relais fermé au chiffre 0. En 1938, sa thèse, intitulée « Analyse symbolique des relais et commutateurs », connaît un fort retentissement. Il s'inspire alors de la théorie de Boltzmann en physique statistique. Il s'intéresse ensuite à la mise au point des systèmes téléphoniques et des ordinateurs. Dans ce contexte, il a fortement contribué à la première victoire au jeu d'échecs de l'ordinateur Deep Blue d'IBM sur le grand maître russe G. Kasparov.

Walter Schottky

Physicien allemand, né à Zurich en 1886 et mort à Pretzfeld en Allemagne en 1976. Professeur de physique théorique à Rostock, il est connu pour ses recherches sur le mouvement des électrons dans les conducteurs et dans les tubes à gaz. En 1920, il découvre l'effet de granulation des électrons qui porte désormais son nom. Il inventa, indépendamment d'Edwin Amstrong, le récepteur superhétérodyne.

William Shockley

Physicien britannique né à Londres en 1910 et mort à Palo Alto en Californie en 1989. Après sa thèse au Caltech (California Institute of Technology), Shockley est employé à la compagnie Bell Telephon dans le but de remplacer les tubes à vide encombrants, notamment la triode, par des composants solides plus petits et plus fiables. Il y parvient en 1948, avec l'aide d'un théoricien J. Bardeen et d'un expérimentateur W. Brattain ; il invente ainsi le transistor, ce qui lui vaut le prix Nobel en 1956. Il termine sa carrière sur un poste de professeur d'ingénierie à Stanford qu'il occupe à partir de 1963. Ses prises de position sur l'amélioration de la race humaine, notamment par la stérilisation des « faibles » et le don du sperme des savants, surprennent et déçoivent une grande partie de la communauté scientifique internationale.

Nicolas Tesla

Ingénieur croate, né à Smiljan en 1856 et mort à New-York en 1943. Employé d'abord par les compagnies d'équipements électriques de Budapest, puis par Edison aux USA, il invente plusieurs dispositifs, dont le moteur polyphasé et le moteur à courant alternatif. Il fonde aux USA une société de construction de moteurs en courant alternatif ; ses résultats font de lui le fondateur de l'électrotechnique moderne. Il est le premier à montrer l'intérêt du transport de la puissance électrique sous une tension variable, en augmentant la tension avant le transport et en la diminuant après, à l'aide de transformateurs. Cette invention fut largement utilisée par l'inventeur et industriel américain G. Westinghouse. Piètre gérant de ses inventions, Tesla finit sa vie misérablement à New-York.

Léon Charles Thévenin

Ingénieur français de l'École Polytechnique, né à Meaux en 1857 et mort à Paris en 1926. Il est surtout connu pour avoir établi un théorème très utile qui permet de considérer un réseau linéaire entre deux points comme une source de tension entre ces points.

Alessandro Volta

Physicien italien, né à Côme en 1745 et mort aussi à Côme en 1827. Il est connu pour avoir introduit la pomme de terre en Italie et pour ses recherches en électricité qui le conduisent à inventer la pile électrique. Il fut fait comte par Bonaparte en 1801. L'unité SI de tension électrique dérive de son nom.

Balthasar van der Pol

Physicien hollandais, né à Utrecht en 1889 et mort en 1959. Il obtint son doctorat de physique en 1920, sous la direction de J. Fleming et J. Thompson. Intéressé par les aspects modernes de la physique expérimentale, il s'engage dans l'analyse de la stabilité des oscillations électriques, obtenues avec des circuits comportant des tubes à vide. Il découvre alors les mouvements chaotiques de nature déterministe, ce qu'il publie, dans le journal britannique *Nature*, en 1927, avec van der Mark. Il proposa aussi différents modèles pour représenter le mouvement périodique du cœur, dans le but de soigner les patients atteints d'arythmie.

Charles Wheatstone

Physicien britannique, né à Gloucester en 1802 et mort à Paris en 1875. Autodidacte passionné par la technique, il s'intéresse d'abord à la propagation des sons produits par des instruments musicaux. Il est surtout connu pour avoir perfectionné un dispositif, imaginé plus tôt par Samuel Christie, qui lui permet de mesurer avec précision une résistance par la méthode du pont, laquelle porte désormais son nom. C'est lui qui inventa le relais électrique ou interrupteur électrique commandé à distance.

Max Wien

Physicien allemand, né en 1866 à Königsberg et mort à Iena en 1938. Nommé professeur à l'École Technique de Dantzig en 1904, puis à l'Université d'Iena en 1911, il travaille sur les oscillateurs électriques et sur la télégraphie sans fil ; son nom est associé à l'oscillateur bien connu et au filtre de particules utilisé en optique corpusculaire. Il ne faut pas le confondre avec son cousin Wilhem Wien, connu lui pour avoir donné son nom à une loi sur le rayonnement du corps noir (cf. *Thermodynamique*).

Clarence Zener

Physicien américain, né à Indianapolis (Indiana) en 1905 et mort en 1993. Après sa thèse en physique quantique sur les molécules diatomiques, qu'il obtient à Harvard en 1930, il travaille dans les laboratoires Bell ; là, il interprète la forte conduction qui apparaît lorsqu'une diode est connectée en inverse et soumise à un champ électrique intense : par effet tunnel, les électrons de la bande de valence peuvent passer dans la bande de conduction. Cette diode, appelée depuis diode Zener, est utilisée pour réaliser des tensions stationnaires stabilisées.

Constantes physiques, notations et symboles

Les symboles utilisés sont généralement ceux recommandés par l'AFNOR et par l'UTE (Union Technique de l'Électricité)

$e = 1,602\,176\,462\,(63) \times 10^{-19} \text{ C}$	charge élémentaire (charge du proton)
$-e$	charge de l'électron
$\text{eV} = 1,602\,176\,462\,(63) \times 10^{-19} \text{ J}$	électron-volt
$\varepsilon_0 = 8,854\,187\,817 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$	permittivité du vide (valeur exacte)
$q_e^2 = e^2 / (4\pi\varepsilon_0)$	$q_e^2 = 230,707\,705\,6 \times 10^{-30} \text{ SI}$
$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$	perméabilité du vide (valeur exacte)
$c = 2,997\,924\,58 \times 10^8 \approx 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	vitesse de la lumière dans le vide (valeur exacte)
$m_e = 0,910\,938\,188(72) \times 10^{-30} \text{ kg},$ $(m_e c^2 = 0,510\,998 \text{ MeV} \approx 0,511 \text{ MeV})$	masse de l'électron
$m_p = 1,672\,621\,58(13) \times 10^{-27} \text{ kg},$ $(m_p c^2 = 938,272 \text{ MeV})$	masse du proton
$h = 6,626\,068\,76(52) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	constante de Planck
$\hbar = h / (2\pi) = 1,054\,571\,596(82) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	constante de Planck divisée par 2π ($\hbar$ bar)
$r_e = q_e^2 / (m_e c^2) = 2,817\,934\,23 \times 10^{-15} \text{ m}$	rayon classique de l'électron ($r_e \approx 2,8 \text{ fm}$)
$G = 6,673(10) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	constante de gravitation
$R = 8,314\,472(15) \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	constante molaire des gaz parfaits
$N_A = 6,022\,141\,99(47) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	nombre d'Avogadro
$k_B = R / N_A = 1,380\,650\,3(24) \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$	constante de Boltzmann
$F = N_A e = 96\,485,341\,5(39) \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$	constante de Faraday
$\mu_B = e\hbar / (2m_e) = 927,400\,899(37) \times 10^{-26} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$	magnéton de Bohr
$\mu_N = e\hbar / (2m_p) = 5,050\,783\,17(20) \times 10^{-27} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$	magnéton nucléaire
$\Phi_0 = h / (2e) = 2,067\,833\,636(81) \times 10^{-15} \text{ Wb}$	quantum de flux magnétique
$R_K = h / e^2 = 25\,812,807\,572(95) \Omega$	constante de von Klitzing.
$\alpha = q_e^2 / (\hbar c) 7,297\,352\,533(27) \approx 1/137,036$	constante de structure fine.

$\ln$	logarithme népérien
$\lg$	logarithme décimal
lb	logarithme binaire
$\exp$	exponentielle
$\approx$	sensiblement égal à
$\sim$	de l'ordre de
$\text{///}, \equiv$	Symbole de la masse en électricité, origine des tensions dans un montage, et symbole de la terre
$\overline{s}(t)$	valeur moyenne du signal $s(t)$ au cours du temps
$s_a(t)$	signal analytique associé au signal réel $s(t)$
$\langle s \rangle$	valeur moyenne du signal s sur un ensemble statistique
$\text{sgn}(s)$	signe de s
$\underline{s}$	valeur complexe associée à s
$ \underline{s} $	module de $\underline{s}$
$\underline{s}^*$	complexe conjugué de $\underline{s}$
$\text{Re}\{\underline{s}\}, \text{Im}\{\underline{s}\}$	parties réelle et imaginaire du signal $\underline{s}$
I, I_{ef}	intensité d'un courant stationnaire et intensité efficace d'un courant sinusoïdal
I_{AB}	intensité d'un courant dans un conducteur dans le sens A vers B
U, U_{ef}	tension stationnaire et tension efficace d'une tension sinusoïdale
$U_{AB} = V_A - V_B$	tension entre les points A et B , aux potentiels respectifs V_A et V_B
$i(t)$	intensité d'un courant variable
$u(t)$	tension variable
E, e	forces électromotrices stationnaire et variable (f.e.m)
$\mathcal{I}, \iota$	courants électromoteurs stationnaire et variable (c.e.m); prononcer iota
$\mathcal{P}(t), \mathcal{P}, \mathcal{Q}, \mathcal{S}, \underline{\mathcal{P}}$	puissances électriques instantanée, moyenne ou active, réactive, apparente, complexe
R et $G = 1/R$	résistance et conductance d'un résistor
C	capacité d'un condensateur
L et M	inductance propre et inductance mutuelle
E_{Th} et R_{Th}	f.e.m et résistance interne d'un générateur de Thévenin en régime stationnaire
e_{Th} et Z_{Th}	f.e.m et impédance interne d'un générateur de Thévenin en régime sinusoïdal
$\mathcal{I}_N$ et G_N	c.e.m et conductance d'un générateur de Norton en régime stationnaire
ι_N et Y_N	c.e.m et admittance d'un générateur de Norton en régime sinusoïdal

T, f, ω	période, fréquence, pulsation d'un signal sinusoïdal
$i(t) = i_m \cos(\omega t + \phi_i) = I\sqrt{2} \cos(\omega t + \phi_i)$	intensité d'un courant sinusoïdal
$\underline{i}(t) = i_m \exp[j(\omega t + \phi_i)]$	expression complexe de l'intensité d'un courant sinusoïdal ou intensité analytique
$u(t) = u_m \cos(\omega t + \phi_u) = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \phi_u)$	tension sinusoïdale
$\underline{u}(t) = u_m \exp[j(\omega t + \phi_u)]$	expression complexe d'une tension sinusoïdale ou tension analytique
$\varphi = \phi_u - \phi_i$	déphasage de la tension sinusoïdale par rapport à l'intensité du courant sinusoïdal
q	charge électrique
$Z = R + jX$	impédance Z , résistance R et réactance X d'un dipôle
$Y = 1/Z = G + jB$	admittance Y , conductance G et susceptance B d'un dipôle
γ	conductivité d'un matériau, inverse de la résistivité ρ
$I_e, i_e, \underline{i}_e, U_e, u_e, \underline{u}_e$	intensités et tensions à l'entrée d'un système
$I_s, i_s, \underline{i}_s, U_s, u_s, \underline{u}_s$	intensités et tensions à la sortie d'un système
Z_e, Z_s, R_e, R_s	impédance d'entrée et de sortie, résistance d'entrée et de sortie
X_e, X_s	matrices colonnes tension-courant à l'entrée et à la sortie d'un quadripôle
U_Z, U_d	tension Zener et tension de seuil d'une diode
AO	amplificateur opérationnel
$\epsilon = u_+ - u_-$	tension entre les bornes non inverseuse et inverseuse d'un AO
U_a, U_{sat}	tensions d'alimentation et de saturation d'un AO
$H(j\omega) = \underline{T}(f) = \underline{\mathcal{H}}(x)$	fonction de transfert en électronique, x étant la pulsation réduite ou la fréquence réduite
$H(0) = \underline{T}(0) = \underline{\mathcal{H}}(0)$	facteur d'amplification stationnaire en tension
$G_u = 20 \lg \underline{T}(f) $	gain en tension exprimé en décibel
$\text{TF}\{s(t)\}$ ou $\widehat{s}(f)$	transformée de Fourier de la fonction $s(t)$
$\text{TL}\{s(t)\}$ ou $S(p)$	transformée de Laplace de la fonction $s(t)$
$\widehat{\underline{i}}(f), \widehat{\underline{u}}(f)$	spectres de Fourier de $\underline{i}(t)$ et de $\underline{u}(t)$
$\text{rect}(t)$	fonction créneau, de valeur 1 pour $ t \leq 0,5$
$\text{sinc}(t) = \sin(\pi t)/(\pi t)$	fonction sinus cardinal
$Y(t)$	fonction d'Heaviside ou échelon
$\delta(t)$ et $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$	distribution de Dirac et peigne de Dirac
A_u	facteur d'amplification en tension
μ	coefficient d'atténuation linéique en intensité.
$s_a(t)$	signal analytique associé au signal réel $s(t)$
$C_{12}(t)$	fonction d'intercorrélation entre deux signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$

$$s(t) = a_{p,m}[1 + mg_i(t)] \cos(\omega_p t)$$

 κ_f
 κ_p
 $s(t; \Lambda)$
 σ^2
 RSB
 $I_s = -\text{lb } P_s$
 $H = -\sum_s P_s \text{lb } P_s$

expression canonique d'une porteuse, de fréquence $f_p = \omega_p/(2\pi)$, modulée en amplitude

coefficient de modulation de fréquence

coefficient de modulation de phase

expression d'un signal aléatoire, Λ étant la variable aléatoire

variance d'un signal aléatoire

rapport signal sur bruit

information associé au message s de probabilité P_s

entropie de Shannon associée à un ensemble de messages s de probabilité P_s .

Alphabet grec

alpha	A	α	éta	H	η	nu	N	ν	tau	T	τ
bêta	B	β	théta	Θ	θ	xi	Ξ	ξ	upsilon	Y	υ
gamma	Γ	γ	iota	$\mathcal{I}$	ι	omicron	O	o	phi	Φ	ϕ
delta	Δ	δ	kappa	K	κ	pi	Π	π	chi	X	χ
epsilon	E	ϵ	lambda	Λ	λ	rho	P	ρ	psi	Ψ	ψ
zéta	Z	ζ	mu	M	μ	sigma	Σ	σ	oméga	Ω	ω

Description de l'ouvrage

Cet ouvrage « Électronique, fondements et applications » comporte trois grandes parties qui correspondent aux différentes étapes de l'enseignement de cette discipline dans les Universités ou dans les Classes Préparatoires aux Grandes Écoles scientifiques. L'organisation du cours est la suivante :

i) Première année de la licence : fondements

Leçons 1 à 8 : lois de Kirchhoff en régimes stationnaire et variable sinusoïdal, oscillations forcées, résonance, régimes transitoires, théorèmes de base sur les circuits linéaires, composants électroniques, amplificateurs opérationnels.

ii) Deuxième année de la licence : développements

Leçons 9, 10, 11, 13, 14, 15 : compléments sur les amplificateurs opérationnels, filtres actifs, oscillations couplées, rétroaction et asservissements, oscillateurs électriques, signaux déterministes.

iii) Troisième année de la licence et master : compléments

Leçons 12, 16, 17, 18, 19, 20 : effets non linéaires, modulation et démodulation, bruits, électronique logique et numérique, conversion analogique-numérique, théorie de la communication de Shannon.

Les leçons 1, 2, 5, 6, 8, 13, 15, 17, ont un rôle central, car elles contiennent les éléments indispensables (définitions, lois et principes) à l'étude des leçons qui suivent. Il faut donc les étudier avant d'aborder les suivantes. Par exemple, si l'on souhaite étudier la leçon 14 sur les oscillateurs électriques, il est recommandé de lire auparavant les leçons 1, 2, 5, 6, 8 et 13. Même si les autres leçons sont présentées dans un certain ordre, il est possible de les lire dans un ordre différent qui tienne compte des préoccupations particulières du lecteur ; en effet, les leçons sont quasi autonomes et le renvoi à des formules éloignées pratiquement inexistant.

Méthode de travail

Lecture des leçons

Dans une phase d'initiation, une leçon doit être lue une première fois, en insistant sur l'introduction, laquelle situe cette leçon dans l'ensemble du cours, et sur la conclusion qui répertorie l'ensemble des résultats essentiels. Dans une deuxième phase, l'étudiant doit refaire avec soin tous les calculs intermédiaires. Enfin, une dernière lecture devrait lui permettre d'appréhender complètement la leçon, notamment les résultats essentiels, les exemples significatifs et les ordres de grandeur.

Exercices et problèmes

L'étudiant doit ensuite passer à la phase d'application en faisant des exercices simples et courts, directement liés au contenu de la leçon ; il doit tenter de résoudre ces exercices avec le seul support que constitue le cours. En cas de difficultés, un coup d'œil rapide sur la solution, proposée en fin d'ouvrage ou sur le site web correspondant, devrait l'aider. Il lui faut éviter une simple lecture rapide de la solution

proposée et la mémorisation de la démonstration : mieux vaut revenir sur les fondements de la leçon pour résoudre l'exercice ; en cas de difficulté majeure, consulter la solution et tenter de la refaire, sans aucune aide, un ou deux jours plus tard.

Une fois ces exercices de base rédigés, l'étudiant pourra affronter des épreuves plus longues inspirées d'examens et concours.

Révision

Pour réviser, une ultime lecture devrait conforter l'apprentissage. Ne pas hésiter à souligner *au crayon* les parties essentielles et à porter en marge des remarques personnelles, suggérées par la lecture d'autres livres ou de documents annexes, tels que des revues scientifiques à grand public (La Recherche, Pour la Science, Science et Vie, Électronique pratique, etc.).

Comment résoudre un problème sur les circuits

On résout correctement un problème sur les circuits, si l'on s'astreint à répondre *successivement à plusieurs questions*, même lorsque le texte n'invite pas explicitement à y répondre.

Le régime du circuit est-il stationnaire quasi stationnaire ou transitoire ?

En régime stationnaire, on ne prend en compte que les générateurs et les résistors du circuit, les condensateurs éventuels se comportant comme des interrupteurs ouverts, les diodes pratiquement comme des interrupteurs fermés dans le sens passant et comme des interrupteurs ouverts dans le sens inverse (cf. chapitre 1).

En régime quasi stationnaire sinusoïdal, l'analyse est analogue à la précédente, pourvu que l'on utilise la notation complexe pour exprimer les impédances associées à une inductance et à une capacité, respectivement $jL\omega$ et $1/(jC\omega)$ (cf. chapitre 2). Soulignons que ce concept d'impédance n'a de sens qu'en régime sinusoïdal ; en régime quelconque pour les circuits linéaires une analyse de Fourier est indispensable.

En régime transitoire, la relation vérifiée par les grandeurs du circuit se présente sous la forme d'une équation différentielle ; la résolution de cette dernière nécessite la connaissance des conditions initiales du circuit.

Peut-on ramener le circuit à un diviseur de tension ou à un diviseur de courant ?

Très souvent, les circuits simples se présentent comme des diviseurs de tension ou de courant, auxquels cas les expressions à retenir, duales l'une de l'autre, sont (cf. chapitre 1) :

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \quad \text{et} \quad I_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} I$$

Dans tous les cas, on doit tenter de simplifier le circuit (associations de dipôles, théorème de Thévenin, etc.) autour du dipôle étudié.

N'est-il pas préférable d'appliquer la loi des nœuds sous la forme du théorème de Millman ?

Lorsque les grandeurs intéressantes sont des tensions ou leur rapport, il est préférable d'éliminer directement les intensités et d'écrire la loi des nœuds en fonction des tensions. C'est précisément ce que permet le théorème de Millman (cf. chapitre 1).

Le circuit présente-t-il des éléments de symétrie ?

L'analyse des symétries d'un circuit permet de vérifier la cohérence physique des résultats obtenus et d'éviter des calculs fastidieux.

Le système étudié est-il linéaire ou non ?

Cette question est essentielle, car une faute fréquente consiste à appliquer, à des circuits comportant des éléments non linéaires, des théorèmes fondés précisément sur la linéarité (cf. chapitre 5).

Doit-on effectuer un calcul en notation réelle ou en notation complexe ?

Rappelons que la notation complexe n'est qu'un intermédiaire technique commode, voire indispensable, que l'on doit utiliser uniquement en régime sinusoïdal. En régime quelconque, une analyse de Fourier s'impose. Concernant la puissance en régime sinusoïdal, comme il s'agit d'une grandeur quadratique, le retour à la notation réelle est recommandé, à moins d'introduire le concept commode de puissance complexe (cf. chapitre 2).

La caractéristique $I(U)$ des dipôles est-elle tracée en convention récepteur ou non ?

Dans tout l'ouvrage, nous avons privilégié la *convention récepteur* (de puissance) des dipôles, à la fois pour des raisons d'efficacité pédagogique et de conformité aux conventions adoptées en physique, précisément en thermodynamique : certains dipôles, tels que la photodiode, se comportent soit en récepteur (photodétecteur) soit en générateur (photopile). En outre, les caractéristiques de tous les dipôles ont été mises sous la forme standard $I(U)$, car très souvent l'entrée du dipôle, considéré comme un système, est la tension d'entrée alors que la sortie est l'intensité du courant qui le parcourt.

La loi d'Ohm s'applique-t-elle ? Comment ?

S'il s'agit d'un conducteur ohmique, la loi d'Ohm s'applique sous les formes simples $U = RI$ ou $I = GU$, encore faut-il préciser que, si A et B sont les bornes du dipôle, cela suppose précisément que :

$$U = U_{AB} = U_A - U_B \quad \text{et} \quad I = I_{AB}$$

Une façon mnémotechnique de retenir ce résultat est de noter que ces formules sont valables si les flèches de courant et de tension sont de sens opposés.

Quel est le nombre de variables indépendantes dont dépend l'état électrique du système ?

Une fois écrites les équations exprimant les lois physiques (de Kirchhoff, d'Ohm, de Faraday, etc.), effectuer le décompte du nombre de variables indépendantes, dont dépend l'état électrique du système, est essentiel avant de tenter de résoudre le système d'équations obtenues.

Comment résoudre le système d'équations des circuits ?

Tout dépend du nombre de variables. S'il est faible, inférieur ou égal à deux, la méthode de substitution est la plus rapide. S'il est de trois ou quatre, la méthode matricielle est intéressante. Au-delà, il vaut mieux prévoir l'utilisation d'un logiciel, par exemple MATLAB.

Interpréter les résultats obtenus, notamment leur signe, et discuter la réalité des ordres de grandeur ?

Cette phase finale est essentielle, car elle permet de déceler des erreurs de maladresse. Les résultats obtenus sont algébriques : il convient donc d'estimer la crédibilité d'une intensité parcourant un conducteur dans le sens opposé à celui adopté *a priori* ou d'une intensité trop grande pour être réaliste.

L'électronique en vingt questions

1. Si on utilisait l'expression $\mathcal{P} = RI^2$ de la puissance reçue par un résistor, aux bornes duquel une pile impose une tension U , on serait conduit à conclure que la puissance est proportionnelle à R , ce qui est incorrect. *Pourquoi ?*
2. La mesure, à l'aide d'un ohmmètre, de la résistance du filament d'une lampe à incandescence, sur laquelle on lit les indications 100 W pour la puissance et 230 V pour la tension efficace, donne $40\ \Omega$. *Pourquoi la puissance inscrite n'est-elle pas $230^2/40 = 1\,322,5\text{ W}$?*
3. Les distributeurs de puissance électrique utilisent préférentiellement des tensions sinusoïdales triphasées et de forte amplitude, qu'ils transforment en tensions monophasées, de faible amplitude, près de l'utilisateur. *Pourquoi ?*
4. On mesure les différentes tensions efficaces aux bornes du générateur, du résistor, de la bobine et du condensateur, dans un circuit résonnant série. On constate que la première tension n'est pas la somme des trois autres. *Pourquoi ?*
5. Une pile électrique, de f.e.m $1,5\text{ V}$, connectée aux bornes d'une diode, de tension de seuil $2,5\text{ V}$, ne rend pas cette dernière passante, contrairement à deux de ces mêmes piles placées en série. *Pourquoi le théorème de superposition ne s'applique-t-il pas dans ce cas ?*
6. *Pourquoi polarise-t-on une diode Zener en inverse ?*
7. Un amplificateur peut fournir à sa sortie un signal variable d'une puissance supérieure à la puissance du signal d'entrée. *Pourquoi ce résultat n'est-il pas en contradiction avec le premier principe de la thermodynamique, selon lequel on ne peut pas créer de l'énergie (cf. Thermodynamique) ?*
8. La résistance ohmique d'un conducteur est toujours positive. Or, on entretient les oscillations électriques produites dans un circuit oscillant en compensant la résistance ohmique de la bobine et du condensateur par un système de résistance négative. *Pourquoi cette dernière affirmation est-elle néanmoins fondée ?*
9. *Pourquoi* exprime-t-on généralement le facteur d'amplification en tension d'un amplificateur ou d'un filtre par son gain en décibel et définit-on la bande passante de cet amplificateur à -3 dB ?
10. *Pourquoi*, dans les montages de base d'un amplificateur opérationnel, les résistances ne doivent-elles être ni trop faibles, ni trop fortes ?
11. Les bobines ne sont pratiquement plus utilisées en électronique, les diodes Esaki (à effet tunnel) non plus. *Pourquoi ?*
12. Les filtres passifs sont le plus souvent délaissés au profit des filtres actifs. *Pourquoi ?*
13. L'espace des phases en théorie des circuits peut être de dimension impaire, alors qu'en mécanique il est nécessairement de dimension paire. *Pourquoi ?*
14. Sur un oscilloscope convenablement synchronisé, on peut observer la trace parfaitement stable des signaux délivrés par un oscillateur auto-entretenu, alors que ces derniers sont présentés comme des systèmes instables. *Pourquoi ?*

- 15.** La fréquence d'un signal sinusoïdal est une grandeur physique définie positive, homogène à l'inverse d'une durée. *Pourquoi* le spectre de Fourier de ce signal fait-il apparaître des fréquences négatives ?
- 16.** Il est possible d'échantillonner des signaux analogiques, c'est-à-dire de ne considérer que certaines valeurs, prises périodiquement, sans aucune perte d'information. Cette affirmation apparemment paradoxale est cependant vérifiée. *Pourquoi* ?
- 17.** Dans l'enregistrement numérique des sons sur CD, les principaux constructeurs se sont entendus pour utiliser la fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz. *Pourquoi* ?
- 18.** *Pourquoi* la transmission des ondes électromagnétiques à grande distance exige-t-elle la modulation en amplitude ou en fréquence d'une onde porteuse de haute fréquence ?
- 19.** *Pourquoi* un bruit blanc présentant une fréquence maximale de coupure est-il qualifié de bruit rose ?
- 20.** On dit qu'informer c'est surprendre. *Pourquoi* ?

Introduction expérimentale : oscilloscopes et multimètres

La réalisation expérimentale des montages présentés dans cet ouvrage nécessite l'usage d'instruments de contrôle des signaux, tels que les *oscilloscopes* et les *multimètres*. Aussi, dans une introduction expérimentale préalable, proposons-nous de décrire sommairement le fonctionnement de ces appareils de mesure. Il convient avant tout de préciser le concept de signal.

I. — SIGNAUX

En électronique, un *signal* est une tension ou un courant qui peuvent soit transporter une *information*, par exemple audio, d'horloge ou de commande d'un système, soit ne pas en véhiculer, comme c'est le cas pour les tensions d'alimentation ou de polarisation.

On distingue deux types de signaux issus de deux technologies distinctes : le premier type est *analogique* et le second *numérique* ou *digital*. Un signal est *analogique* si sa variation temporelle est *continue* ; c'est le cas de signaux provenant de capteurs physiques. Il est *numérique* s'il varie entre plusieurs niveaux discrets.

On classe habituellement les signaux, selon leur « forme » au cours du temps. Ainsi, les signaux *stationnaires* ont une valeur qui n'évolue pas au cours du temps, par exemple la tension d'alimentation fournie par une pile de 4,5 V, alors que les signaux *variables* varient au cours du temps, comme la tension électrique efficace de 230 V fournie par le réseau électrique français ; ces derniers se classent en deux catégories : les signaux *périodiques* et les signaux *apériodiques*.

I.1. — Signaux périodiques

Un signal périodique $e(t)$ est caractérisé par sa période T et sa fréquence f définies selon :

$$e(t) = e(t + T) \quad \text{et} \quad f = \frac{1}{T}$$

Le domaine de fréquence de l'électronique est très étendu, de quelques mHz (10^{-3} Hz) à plusieurs centaines de GHz (100×10^9 Hz). Le domaine des *basses* fréquences est défini par la validité de l'approximation des régimes quasi-stationnaires (cf. *Électromagnétisme*) ; il s'étend jusqu'à la centaine de MHz (100×10^6 Hz).

Au-delà, la propagation des ondes électromagnétiques doit être prise en compte : c'est le domaine des hyperfréquences.

On reconnaît la caractéristique fondamentale des signaux périodiques par la forme de leur spectre de Fourier qui est constitué de pics régulièrement distribués (cf. annexe 2).

a) Signaux harmoniques ou sinusoïdaux

Un signal *harmonique* ou *sinusoïdal* a pour expression :

$$e(t) = e_m \cos(\omega t + \phi) = e_m \cos(2\pi f t + \phi)$$

dans laquelle e_m est l'amplitude, ϕ la phase à l'origine des temps, ω la pulsation et f la fréquence. Ces signaux sont fondamentaux en électronique, et plus généralement en physique, car ils permettent d'exprimer un signal *réel*, périodique ou non, sous la forme d'une somme discrète ou continue de signaux harmoniques (cf. annexe 2).

b) Signaux symétriques

Un signal est *symétrique* si :

$$e(t) = -e\left(t - \frac{T}{2}\right)$$

c'est-à-dire que l'alternance positive a la même forme que l'alternance négative (Fig. 1).

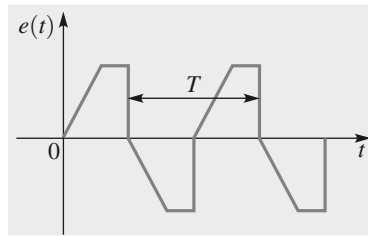


FIG. 1.

La valeur moyenne dans le temps d'un signal symétrique sur une période est nulle. En effet, on a, en surlignant la grandeur considérée pour désigner sa moyenne temporelle :

$$\overline{e(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T e(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} e(t) dt + \frac{1}{T} \int_{T/2}^T e(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \left[e(t) + e\left(t + \frac{T}{2}\right) \right] dt = 0$$

puisque $e(t + T/2) = e(t - T/2) = -e(t)$.

Un signal symétrique n'admet pas d'harmonique pair. Montrons-le en calculant les coefficients de Fourier c_{2n} (cf. annexe 2) :

$$\begin{aligned} c_{2n} &= \frac{1}{T} \int_0^T e(t) \exp\left(-j2\pi \frac{2nt}{T}\right) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^{T/2} e(t) \exp\left(-j2\pi \frac{2nt}{T}\right) dt + \frac{1}{T} \int_{T/2}^T e(t) \exp\left(-j2\pi \frac{2nt}{T}\right) dt \end{aligned}$$

En posant $t' = t - T/2$, cette dernière intégrale devient :

$$\frac{1}{T} \int_0^{T/2} e\left(t' + \frac{T}{2}\right) \exp\left(-j2\pi \frac{2nt'}{T} - j2n\pi\right) dt' = -\frac{1}{T} \int_0^{T/2} e(t') \exp\left(-j2\pi \frac{2nt'}{T}\right) dt'$$

puisque $e(t' + T/2) = -e(t')$. On en déduit $c_{2n} = 0$.

c) Signaux de formes canoniques

Les générateurs de signaux, dont font partie les Générateurs Basse Fréquence (GBF en abrégé), permettent de produire des signaux sinusoïdaux, mais aussi des signaux symétriques de forme canonique, *carrée* $e_{\square}(t)$ et *triangulaire* $e_{\triangle}(t)$, dont la décomposition en série de Fourier donne respectivement (cf. annexe 2), en désignant par e_{cc} la valeur crête à crête des signaux :

$$e_{\square}(t) = e_{cc} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi n/2)}{\pi n/2} \cos\left(2\pi \frac{nt}{T}\right) \quad \text{et} \quad e_{\triangle}(t) = 2e_{cc} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \cos(\pi n)}{(\pi n)^2} \cos\left(2\pi \frac{nt}{T}\right)$$

d) Rapport cyclique

Si τ_p et τ_n sont respectivement la durée de l'alternance positive et celle de l'alternance négative d'un signal périodique, de période T , les *rapports cycliques* à « l'état haut » α_h et à « l'état bas » α_b , sont respectivement les facteurs suivants :

$$\alpha_h = \frac{\tau_p}{T} \quad \text{et} \quad \alpha_b = \frac{\tau_n}{T} \quad \text{avec} \quad \tau_p + \tau_n = T \quad \text{et donc} \quad \alpha_p + \alpha_n = 1$$

On les exprime souvent en pourcentage.

Exemple : un signal créneau, délivré par un GBF, de fréquence 50 Hz, est positif pendant 5 ms au cours d'une période ; le rapport cyclique du signal relativement à l'état haut vaut donc :

$$\alpha_h = \frac{\tau_p}{T} = \tau_p f = 5 \times 10^{-3} \times 50 = 0,25 \quad \text{ou} \quad 25\%$$

I.2. — Signaux apériodiques

Un signal est *apériodique*, c'est-à-dire non périodique, si son spectre de Fourier est continu (cf. annexe 2). Les signaux aléatoires et le bruit (cf. chapitre 17), ainsi que les signaux chaotiques (cf. annexe 6), sont des exemples de signaux apériodiques.

Notons que tout signal réel est apériodique, puisque limité dans le temps. Néanmoins, un signal limité dans le temps, mais constitué d'une succession périodique de motifs identiques en assez grand nombre, peut être considéré comme périodique avec une excellente approximation (cf. annexe 2).

II. — L'OSCILLOSCOPE

L'oscilloscope est un instrument qui fut inventé en 1897 par le physicien allemand K. Braun, ce qui lui valut le prix Nobel en 1909. On le considère comme l'ancêtre des téléviseurs construits dans les années 1920 et 1930.

II.1. — Oscilloscopes analogiques et oscilloscopes numériques

Avec cet instrument, on visualise l'évolution temporelle d'une ou plusieurs tensions dans un circuit, la forme de ces signaux. Aussi est-il souvent appelé « l'œil » de l'électronicien.

Les oscilloscopes couramment utilisés sont principalement de deux types.

i) Les oscilloscopes analogiques

Les oscilloscopes analogiques possèdent une source, la cathode, qui émet des électrons, soit par effet thermo-électronique en raison de sa température, soit par effet de champ (cf. *Quantique*). Les électrons sont accélérés dans un tube à vide vers une anode trouée portée à une haute tension de l'ordre de 30 kV. L'impact sur un écran photo-luminescent forme un point lumineux ou *spot* (point en anglais).

Deux séries de deux plaques parallèles, l'une portée à une tension proportionnelle à la tension à visualiser, l'autre orthogonale à la première série, soumise à une tension en dents de scie et proportionnelle au temps, provoquent la déviation du faisceau électronique et donc l'apparition d'une *trace* sur l'écran d'observation.

La durée mise par les électrons pour atteindre le détecteur étant négligeable (de l'ordre de 10 ns), le signal est visualisé pratiquement en *temps réel* sur l'écran. Les oscilloscopes analogiques sont encombrants et lourds, en raison du tube à vide et de l'alimentation du canon à électrons.

ii) les oscilloscopes numériques.

Dans les oscilloscopes *numériques*, on échantillonne la tension à visualiser, c'est-à-dire qu'on ne considère qu'un ensemble de valeurs discrètes régulièrement réparties au cours du temps. Ce n'est qu'après cette opération que le signal est affiché sur un écran, ou *moniteur*, dont la technologie s'apparente à celle des ordinateurs portables actuels ; le signal est donc visualisé en temps *différé*. Les oscilloscopes numériques se distinguent des analogiques par un encombrement et un poids moindre, car ils utilisent largement les possibilités de miniaturisation des composants ; avec ce type d'oscilloscope, on a aisément accès aux caractéristiques principales du signal : fréquence, période, valeur efficace, valeur moyenne ou valeur de crête, etc.

Malgré des différences technologiques importantes, les fonctions les plus courantes sont communes aux deux types d'oscilloscope. Dans la suite, on approfondit l'analyse sur un exemple de façade d'oscilloscope « standard », (Fig. 2), ce qui facilite leur utilisation dans les divers montages.

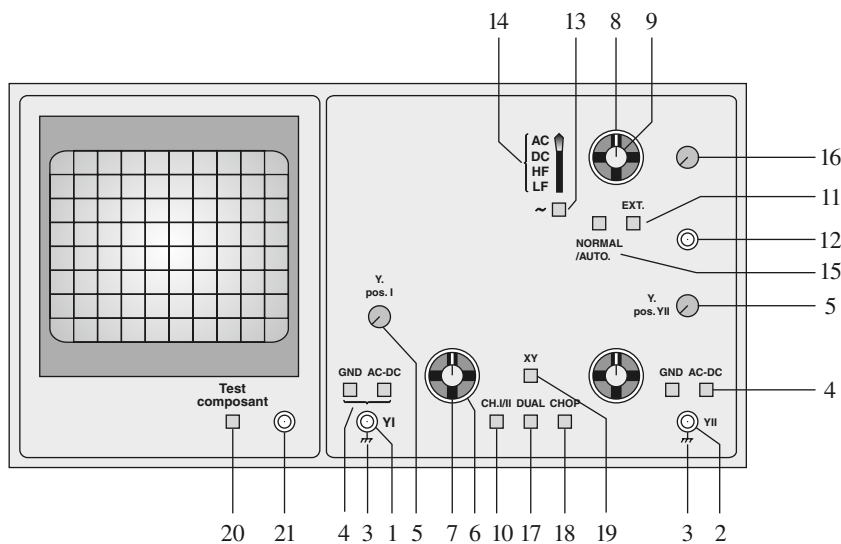


FIG. 2.

II. 2. — Branchement de l'oscilloscope

a) Masse de l'oscilloscope

La plupart des oscilloscopes possèdent deux entrées ou *voies* que l'on désigne par les lettres Y_1 et Y_2 (points 1 et 2 de la figure 2). Ces voies ont une borne commune, la *masse* (point 3), ou tension de référence, généralement reliée à la prise de terre de l'instrument. Le branchement de la masse de l'oscilloscope dans le circuit doit obéir à quelques règles essentielles.

i) Si la masse d'un autre appareil utilisé dans le montage, par exemple un GBF, est par construction reliée à la terre, le choix du point de masse est contraint. Il est alors nécessaire de relier la masse de l'oscilloscope à la masse de l'autre appareil. Si cette précaution n'est pas prise, la liaison commune par la prise de terre provoquerait un court-circuit, c'est-à-dire la mise au même potentiel de deux points différents du circuit.

ii) Si au contraire, la masse est *flottante*, c'est-à-dire non reliée à la prise de terre, la masse de l'oscilloscope peut être choisie librement en n'importe quel point du circuit.

b) L'entrée du signal

Sauf réglage spécifique, les impédances d'entrée de l'oscilloscope sont élevées ; aussi, l'application d'une tension sur les voies Y_1 et Y_2 perturbe-t-elle peu le système. Un oscilloscope se branche donc en parallèle dans un circuit. Chaque entrée est *couplée* (point 4 sur la figure 2) à la chaîne de traitement interne de l'oscilloscope, selon le schéma de la figure 3. On distingue trois possibilités.

i) Le couplage *DC*, de l'anglais *Direct Current* (courant direct), est le couplage « standard » à utiliser par défaut. La tension du circuit est directement transmise, sans traitement.

ii) La position *GND*, de l'anglais *Ground* (terre), permet d'appliquer une tension nulle sur la voie sans débrancher aucun fil, afin par exemple de centrer verticalement l'origine des tensions en agissant sur le curseur (5).

iii) Le couplage *AC*, de l'anglais *Alternative Current* (courant alternatif), supprime toute composante stationnaire du signal d'entrée, par un filtre passe-haut du premier ordre, dont la fréquence de coupure est de quelques hertz (cf. chapitre 6). Ce couplage est à utiliser lorsque la composante stationnaire d'un signal gêne sa visualisation. Citons par exemple la mesure du déphasage temporel entre deux signaux synchrones dont l'un est décalé en tension, ou encore la visualisation de parasites sur un signal stationnaire d'alimentation. Le couplage *AC* permet alors de mieux repérer le passage par l'origine de la tension décalée. Attention néanmoins à ne pas l'utiliser à trop basse fréquence, car le filtre peut modifier la forme des signaux.

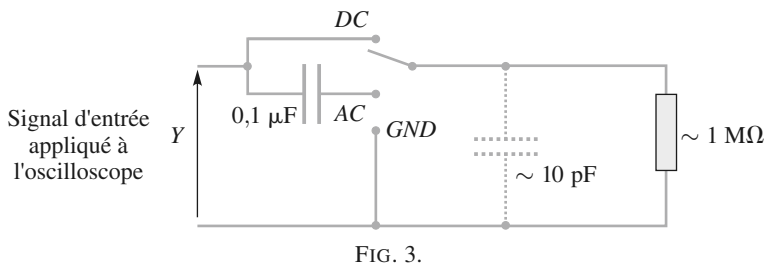


FIG. 3.

II. 3. — Mode balayage temporel

Un oscilloscope est capable d'afficher des signaux variables jusqu'à des fréquences de plusieurs dizaines de MHz. Le coût de l'instrument est d'ailleurs directement lié à l'étendue de sa *bande passante*. En mode balayage, l'axe horizontal est celui du temps et l'axe vertical celui des tensions à étudier.

a) Sensibilité verticale

Avec le sélecteur de calibre (6), on règle l'échelle verticale des tensions. Sur certains oscilloscopes munis d'un réglage fin (7), on peut supprimer manuellement le « calibre » de cette échelle et donc ajuster l'amplitude d'une courbe sur l'écran. Il est alors possible de mesurer :

i) une durée de montée, c'est-à-dire la durée nécessaire pour atteindre, en régime transitoire, une fraction déterminée de la tension établie,

ii) une fréquence de coupure en recherchant la fréquence pour laquelle l'amplitude de la courbe est réduite dans le rapport $7/5 = 1,4 \approx \sqrt{2}$, dans la pratique de sept carreaux dans la bande passante à cinq carreaux à la coupure.

b) Base de temps

Le sélecteur de calibre (8) permet de régler l'échelle horizontale temporelle, ou *base de temps*. Comme précédemment, sur certains oscilloscopes dotés d'un réglage fin (9), on supprime le calibrage de cette échelle, ce qui permet par exemple de mesurer, en mode bicourbe, le déphasage entre deux signaux synchrones : on ajuste la période à l'écran du signal de référence sur neuf carreaux ; chaque carreau de retard ou d'avance du signal déphasé correspond alors à $360/9 = 40^\circ$ soit $0,7$ rad.

c) Synchronisation

Le but de la *synchronisation* est d'afficher un signal *stable* sur l'écran de l'oscilloscope. Elle est essentielle pour observer confortablement un signal, car une mauvaise synchronisation provoque un déplacement plus ou moins lent du signal sur l'écran, appelé *dérive*. En effet, si les tensions en début et en fin de balayage diffèrent, deux traces consécutives ne se superposeront pas ; le signal dérive.

Il existe plusieurs modes de synchronisation.

i) Mode *normal* (15) : la représentation temporelle d'une tension sur l'écran d'un oscilloscope est celle donnée sur la figure 4. Une fois fixé un critère de déclenchement du balayage du spot, par exemple le dépassement d'un *niveau de tension* réglable (16), une première trace se forme à laquelle succède une durée d'attente, jusqu'à un autre déclenchement ; une nouvelle trace apparaît, et ainsi de suite.

ii) Mode *automatique* (15) : dans ce mode, un déclenchement forcé permet de visualiser le signal, même si le critère de déclenchement n'est pas réalisé.

iii) Mode *monocoup* : sur les oscilloscopes numériques, le mode de balayage monocoup produit, après son déclenchement et une fois l'instrument *armé*, une trace unique ; on l'utilise notamment pour observer un régime transitoire (cf. chapitre 4).

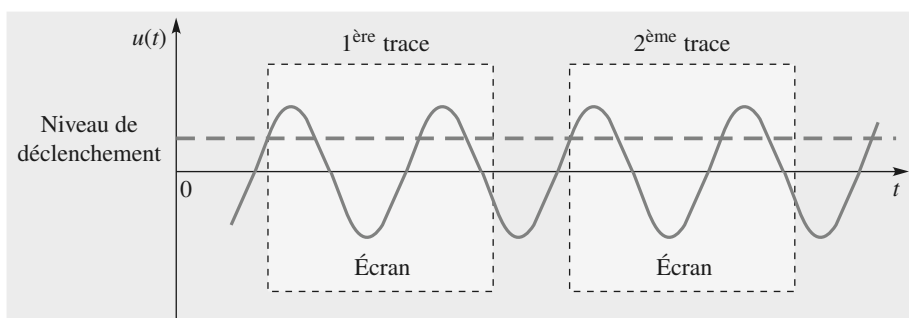


FIG. 4.

d) Signal de déclenchement

Dans l'exemple précédent, le signal de déclenchement choisi était le signal affiché lui-même, c'est-à-dire l'une ou l'autre des voies *internes* Y_1 ou Y_2 (choisie à l'aide du bouton 10). Il est possible d'utiliser un signal *externe* pour déclencher le balayage du spot de l'oscilloscope (point 11) sur l'entrée spécifique (12) ; on peut même choisir la tension délivrée par le « secteur 50 Hz » (13) pour des signaux synchronisés sur le réseau électrique.

Sur certains oscilloscopes, il existe un mode de déclenchement *alterné*, pour lequel les signaux des voies Y_1 et Y_2 sont alternativement affichés. Ce mode est particulièrement adapté à la visualisation de deux signaux de fréquences différentes. En revanche, si les signaux à visualiser sont synchrones, leur déphasage temporel n'est plus apparent, les signaux semblent être en phase.

Le signal choisi est alors *couplé* à l'étage de déclenchement, appelé déclencheur ou *trigger* (gâchette en anglais), selon les modes (14) :

- i) *DC* pour Direct Couplage, c'est-à-dire sans traitement,
- ii) *AC* pour Alternative Current grâce à la suppression de la composante stationnaire du signal,
- iii) *LF* pour Couplage après Filtrage des « basses » fréquences (*low frequencies*), inférieures à 50 kHz,
- iv) *HF* couplage après filtrage des « hautes » fréquences (*high frequencies*), supérieures à 50 kHz.

e) Mode bicourbe

En mode *bicourbe* (17), on affiche simultanément les deux tensions sur les voies Y_1 et Y_2 à l'écran. Sur les oscilloscopes analogiques, on distingue deux modes d'affichage :

i) Le mode alterné, *Alternate*, ou mode par défaut, exhibe, à tour de rôle, l'une puis l'autre voie. En raison de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine, ce mode est adapté aux fréquences élevées. En effet, aux vitesses de balayage importantes, l'alternance rapide des deux courbes produit une impression de simultanéité.

ii) En mode découpé, *Chop* (hache en anglais), on divise la durée de balayage en petits intervalles temporels que l'on utilise pour afficher, à tour de rôle, l'une puis l'autre voie (18). On visualise ainsi simultanément les deux signaux basse fréquence.

II. 4. — Mode XY ou mode Lissajous

En mode *XY* (point 19 de la figure 2), ou mode Lissajous, du nom du physicien français J. Lissajous, la voie Y_1 est envoyée sur l'axe des x et la voie Y_2 sur l'axe des y . Ce mode est parfois utilisé pour déterminer le déphasage entre deux tensions synchrones sinusoïdales, par exemple :

$$u_1(t) = u_{1,m} \cos(\omega t) \quad \text{et} \quad u_2(t) = u_{2,m} \cos(\omega t + \varphi)$$

Éliminons le temps entre ces deux signaux :

$$\frac{u_2}{u_{2,m}} = \cos(\omega t + \varphi) = \cos(\omega t) \cos \varphi - \sin(\omega t) \sin \varphi = \frac{u_1}{u_{1,m}} \cos \varphi - \left(1 - \frac{u_1^2}{u_{1,m}^2}\right)^{1/2} \sin \varphi$$

d'où :

$$\left(\frac{u_2}{u_{2,m}} - \frac{u_1}{u_{1,m}} \cos \varphi\right)^2 = \left(1 - \frac{u_1^2}{u_{1,m}^2}\right) \sin^2 \varphi$$

Il vient en effectuant :

$$\left(\frac{u_1}{u_{1,m}}\right)^2 + \left(\frac{u_2}{u_{2,m}}\right)^2 - 2 \frac{u_1}{u_{1,m}} \frac{u_2}{u_{2,m}} \cos \varphi = \sin^2 \varphi$$

Plusieurs cas se présentent.

i) Lorsque $\varphi = 0$ ou π rad, la courbe décrite par le spot en mode *XY* est une droite passant par l'origine du repère. En effet :

$$\left(\frac{u_2}{u_{2,m}} \pm \frac{u_1}{u_{1,m}}\right)^2 = 0 \quad \text{soit} \quad \frac{u_2}{u_{2,m}} = \pm \frac{u_1}{u_{1,m}}$$

ii) Lorsque $\varphi = \pi/2$ rad ou $-\pi/2$ rad, la courbe est une ellipse dont les axes sont parallèles aux axes de coordonnées puisque :

$$\left(\frac{u_1}{u_{1,m}}\right)^2 + \left(\frac{u_2}{u_{2,m}}\right)^2 = 1$$

iii) Pour toute autre valeur de φ , c'est une ellipse dont les axes sont inclinés par rapport aux axes (u_1, u_2) du repère. On obtient le déphasage φ dans l'intervalle $]-\pi \text{ rad}, \pi \text{ rad}[$ en mesurant sur le graphe le rapport NN'/MM' (Fig. 5). En effet, $MM' = 2u_{2,m}$ et $NN' = 2u_{2,m}|\sin \varphi|$, ce que l'on obtient en faisant $u_1 = 0$ dans l'équation de l'ellipse :

$$|\sin \varphi| = \frac{NN'}{MM'} = \frac{\Delta u_{2,M}}{\Delta u_{2,0}}$$

Si le grand axe de l'ellipse se trouve dans le premier quadrant du système de coordonnées, alors $0 < |\varphi| < \pi/2$ rad ; sinon, $\pi/2 \text{ rad} < |\varphi| < \pi \text{ rad}$.

Le signe de φ dépend du sens de parcours du spot sur l'ellipse. On le détermine en introduisant l'angle polaire θ défini par :

$$\tan \theta = \frac{u_2(t)}{u_1(t)} = \frac{u_{2,m}}{u_{1,m}} \frac{\cos(\omega t + \varphi)}{\cos(\omega t)}$$

et en calculant sa dérivée temporelle $\dot{\theta}$:

$$\dot{\theta}(1 + \tan^2 \theta) = \frac{u_{2,m}}{u_{1,m}} \frac{\omega[-\sin(\omega t + \varphi)\cos(\omega t) + \cos(\omega t + \varphi)\sin(\omega t)]}{\cos^2(\omega t)} = -\omega \frac{u_{2,m}}{u_{1,m}} \frac{\sin \varphi}{\cos^2(\omega t)}$$

Si $\dot{\theta} > 0$, l'ellipse est parcourue dans le sens direct, ce qui correspond à $\sin \varphi < 0$. Si $\varphi > 0$, elle est parcourue dans le sens indirect ou rétrograde.

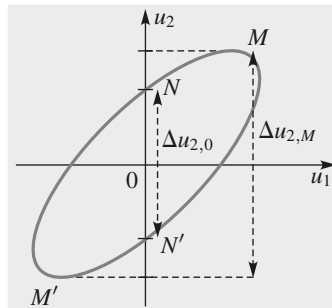


FIG. 5.

II.5. — Mode Test Composant

Si l'action des curseurs de centrage verticaux ne produit aucun effet, c'est probablement en raison de l'activation du mode *Test Composant* (point 20 de la figure 2). Ce mode permet de visualiser la caractéristique d'un dipôle, par exemple une diode, une résistance ou un condensateur, afin de vérifier son bon fonctionnement. Le dipôle se branche directement sur l'entrée spécifique (21), laquelle se comporte comme un générateur de courant alternatif, de fréquence 50 Hz. La tension aux bornes du dipôle à tester est mesurée et portée en abscisse, alors qu'une tension proportionnelle à l'intensité du courant délivré est représentée en ordonnée, afin d'afficher la caractéristique du dipôle.

Un condensateur donne une courbe elliptique d'axes horizontaux et verticaux, un résistor, une droite passant par l'origine, etc.

Remarque : L'absence de dipôle produit à l'écran une trace horizontale caractéristique d'un conducteur ohmique de résistance infinie.

III. — LES MULTIMÈTRES

Les multimètres sont des appareils de mesure regroupant plusieurs instruments au sein d'un seul boîtier. Ils assurent de nombreuses fonctions dont la mesure de tensions, d'intensités de courant et d'impédances ; les plus perfectionnés permettent aussi de mesurer des températures, des fréquences et de contrôler le bon fonctionnement de composants électroniques tels que les diodes ou les transistors.

Si la technologie analogique subsiste encore dans certaines applications, par exemple pour réaliser des vue-mètres ou petits cadrans à aiguille, la technologie numérique s'est imposée au cours de la dernière décennie. Moins fragiles et peu coûteux, les multimètres *numériques* peuvent aujourd'hui être connectés à un ordinateur en vue d'un traitement informatisé des résultats de mesure. Dans la suite, nous utiliserons le multimètre numérique Metrix MX54 (Fig. 6).

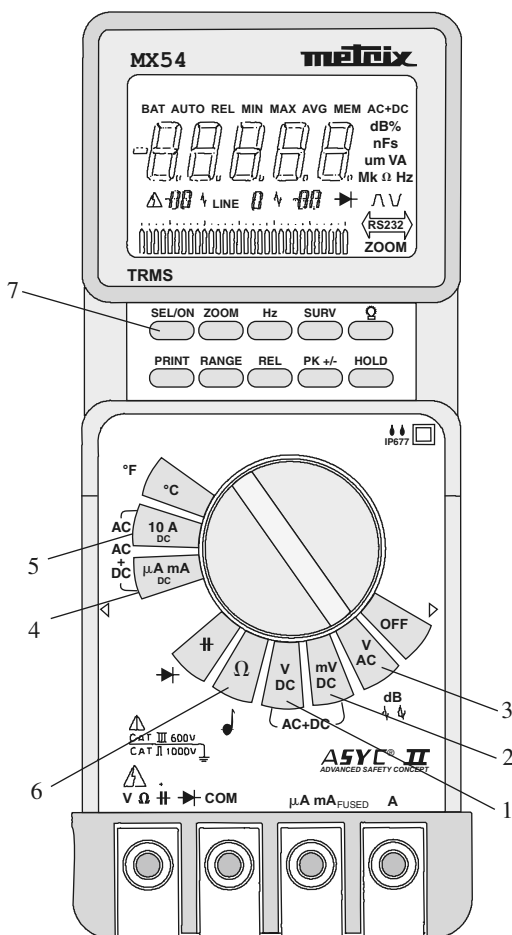


FIG. 6.

III.1. — Sélecteur de fonctions et calibres

a) Sélecteur de fonctions

En façade de l'instrument, un sélecteur permet de choisir la fonction désirée (Fig. 6) :

- i) voltmètre stationnaire (point 1), entrées *COM* et V
- ii) millivoltmètre stationnaire (2), entrées *COM* et V
- iii) voltmètre alternatif (3), entrées *COM* et V
- iv) milliampèremètre stationnaire (4), entrées *COM* et mA
- v) ampèremètre stationnaire (5), entrées *COM* et 10 A
- vi) ohmmètre (6), entrées *COM* et Ω .

b) Calibres

Un *calibre* est une échelle qui fixe un intervalle de mesure. De plus en plus d'instruments sélectionnent automatiquement le calibre le plus approprié à la mesure, même s'il reste toujours la possibilité de choisir manuellement un calibre spécifique. Selon le modèle de multimètre, le choix manuel se fait en agissant sur un sélecteur ou par un bouton-poussoir qui provoque le défilement des différents calibres.

III.2. — Mise en oeuvre

Un *ampèremètre*, d'impédance faible, s'insère en *série* dans un circuit dont on veut mesurer l'intensité du courant qui le parcourt. En revanche, un *voltmètre*, qui présente une grande impédance, se branche en *dérivation*, entre deux points du circuit.

L'impédance d'entrée d'un multimètre numérique dépend du calibre de mesure. Par exemple, sur le calibre « 5 V continu », la notice de l'instrument indique une résistance interne de 11 M Ω .

On mesure une résistance à l'*ohmmètre* en connectant directement les bornes du résistor à celles de l'instrument.

Remarque : Si le résistor est connecté dans un circuit, il faut au préalable l'en extraire, sinon la résistance mesurée serait celle de l'ensemble du circuit aux bornes du résistor.

III.3. — Affichage et précision

a) Affichage

Le cadran d'un multimètre numérique comporte des chiffres appelés *digits*. Chaque digit prend une valeur entière comprise entre 0 et 9. Ainsi, un affichage sur 3 digits donne un nombre compris entre 0 et 999.

Actuellement, la plupart des multimètres disposent d'un digit supplémentaire capable de prendre les valeurs 0 ou 1. Aussi, le digit supplémentaire est-il compté pour « 1/2 » dans le nombre total de digits. Par exemple, un afficheur 3 digits et 1/2 peut donner tous les nombres entiers compris entre 0 et 1999.

Notons que le signe des grandeurs affichées ainsi que la virgule flottante, dont la position varie en fonction du calibre sélectionné, font l'objet d'un affichage séparé.

b) Précision

Dans les notices techniques, la précision, c'est-à-dire l'incertitude ϵ commise sur la lecture de l'intensité d'un courant par exemple, est mise sous la forme :

$$\epsilon = x L + n D = x U_l + n U_d$$

où L désigne la valeur pleine échelle, c'est-à-dire la tension maximale U_l susceptible d'être affichée par l'appareil, et D la valeur U_d de la plus petite unité affichable, ou digit de poids faible ; x s'exprime en pourcentage et n est un entier.

Exemple : l'incertitude $0,6\% L + 30 D$ que l'on commet sur la lecture de l'intensité d'un courant alternatif, de valeur 2 mA , sur le calibre 50 mA , où 1 digit représente $1 \mu\text{A}$, se calcule selon :

$$\epsilon = \frac{0,6}{100} \times 50 + 30 \times 10^{-3} = 0,33 \text{ mA}$$

La même mesure, sur le calibre 2 mA , serait affectée d'une incertitude de :

$$\epsilon = \frac{0,6}{100} \times 2 + 30 \times 10^{-3} = 0,04 \text{ mA}$$

Il est ainsi préférable de sélectionner le calibre le plus petit compatible avec la grandeur à mesurer.

III.4. — Bande passante

La *bande passante* d'un multimètre numérique dépend de la fonction choisie et du calibre. Par exemple, sur le calibre 5 V alternatif, la notice de l'instrument indique une précision sur la bande passante qui est comprise entre 10 et 30 kHz : $1\%, L + 30 D$.

III.5. — Mesure de tensions efficaces

On définit la valeur moyenne U_m et la valeur efficace U ou U_{ef} d'une tension variable périodique, de période T , par :

$$U_m = \overline{u(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad \text{et} \quad U_{ef} = \left[\overline{u^2(t)} \right]^{1/2} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \right]^{1/2}$$

En séparant la tension $u(t)$ en deux composantes, l'une stationnaire U_m , et l'autre alternative de valeur moyenne nulle $u_a(t)$, on obtient les relations suivantes :

$$u(t) = U_m + u_a(t) \quad \text{avec} \quad \overline{u_a(t)} = 0$$

et :

$$U_{ef} = \left\{ \overline{[U_m + u_a(t)]^2} \right\}^{1/2} = \left[\overline{U_m^2 + 2U_m u_a(t) + u_a^2(t)} \right]^{1/2} = \left[U_m^2 + \overline{u_a^2(t)} \right]^{1/2} = (U_m^2 + U_{a,ef}^2)^{1/2}$$

$U_{a,ef}$ désignant la valeur efficace de la tension $u_a(t)$.

a) Voltmètre TRMS

Un voltmètre *TRMS*, de l'anglais True Root Mean Square pour vraie racine de la moyenne du carré, est un voltmètre capable de fournir la valeur efficace U_{ef} de n'importe quel signal périodique $u(t)$. Le sélecteur doit être placé sur V_{AC+DC} (points 1 ou 2 de la figure 6) et la fonction *TRMS* activée par pression (7).

b) Voltmètre RMS

Un voltmètre *RMS*, de l'anglais Root Mean Square pour racine de la moyenne du carré, est un voltmètre qui fournit la tension efficace du signal, une fois ôtée la composante stationnaire. Un voltmètre *RMS* fournit donc la valeur efficace $U_{a,ef}$ de la composante alternative $u_a(t)$.

c) Voltmètre non RMS

En mode alternatif, un voltmètre bas de gamme ne peut pas fournir la valeur efficace d'une tension non sinusoïdale. Il donne la tension de crête U_c et affiche la valeur $U_c/\sqrt{2}$. Cette dernière valeur correspondrait à un signal sinusoïdal, puisque, si $u(t) = u_m \cos(\omega t)$, alors :

$$U_{ef} = \left[\overline{u^2(t)} \right]^{1/2} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T u_m^2 \cos^2(\omega t) dt \right]^{1/2} = \frac{u_m}{\sqrt{2}} \quad \text{car} \quad \overline{\cos^2(\omega t)} = \frac{1}{2}$$

III.6. — Mesure d'intensités de courants efficaces

La technique de mesure des tensions efficaces se transpose à celle des intensités des courants efficaces. Ainsi, un ampèremètre *TRMS* fournit directement I_{ef} , tandis qu'un ampèremètre *RMS* donne $I_{a,ef}$.

1

Lois de base des circuits en régime stationnaire

La science des circuits électriques est une science jeune qui s'appuie fondamentalement sur les lois de l'électromagnétisme de Maxwell. La résolution d'un circuit quelconque, c'est-à-dire la détermination des courants qui parcourent les fils de connexion et celle des tensions entre deux points quelconques du circuit, date de 1845, avec la contribution majeure du physicien allemand G. Kirchhoff, alors âgé de seulement 20 ans.

Les lois qu'il a énoncées sont à la base de deux domaines importants, proches de l'électromagnétisme, sinon inclus :

i) l'électrocinétique, ou science des réseaux électriques, dans laquelle on s'intéresse particulièrement au transport de la puissance électrique dans les fils conducteurs, entre les sources et la zone d'utilisation (Fig. 1.1a) ;

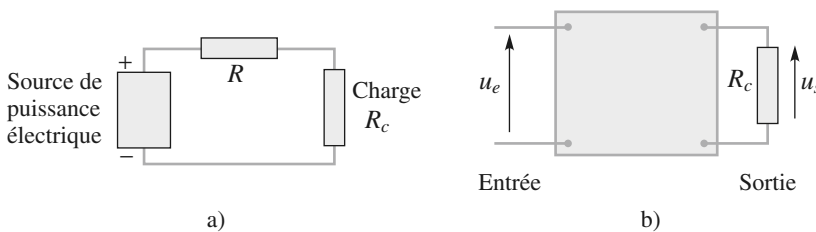


FIG. 1.1.

ii) l'électronique, ou science des systèmes, laquelle traite des signaux qui contiennent une information (Fig. 1.1b). On exclut ici l'analyse des lois constitutives, telles que la loi d'Ohm dans les matériaux conducteurs (cf. *Électromagnétisme*), ainsi que la physique des composants, essentiellement celle des semi-conducteurs, laquelle exige le cadre de la théorie quantique (cf. *Quantique*).

Dans ce chapitre, nous présentons les lois de Kirchhoff en nous limitant au régime *stationnaire*, dit aussi *continu*, pour lequel les tensions et les intensités des courants sont indépendantes du temps.

L'étude des circuits en régime stationnaire est essentielle pour plusieurs raisons : d'abord, elle est plus simple qu'en régime variable ; ensuite elle se généralise facilement aux régimes sinusoïdaux, et surtout elle constitue une étape incontournable car tous les circuits, y compris ceux destinés aux signaux variables, comportent des piles et alimentations stationnaires dont la fonction est notamment

l'apport de puissance aux composants actifs tels que les amplificateurs opérationnels ou les transistors. Enfin, les lois de Kirchhoff sont encore valables en régime variable, pourvu que cette variation ne soit pas trop rapide et satisfasse à l'approximation des régimes quasi stationnaires (cf. chapitre 2).

I. — DIPÔLES EN RÉGIME STATIONNAIRE

I.1. — Définition

On appelle *dipôle électrocinétique*, un système accessible par deux bornes A et B , d'où son nom, et caractérisé par deux seules grandeurs : l'intensité $I = I_{AB}$ du courant qui le traverse, et la tension $U = U_{AB}$ ou différence de potentiel, entre ses bornes.

Rappelons que I s'exprime en ampère et se mesure à l'aide d'un ampèremètre ; U s'exprime en volt et se mesure grâce à un voltmètre (Fig. 1.2).

La nature de la correspondance entre l'intensité du courant qui traverse un dipôle et la tension à ses bornes caractérise ce dipôle. Plusieurs dipôles dont les bornes sont connectées, de telle sorte que l'ensemble forme une ou plusieurs boucles ou *mailles*, constitue un circuit électrique et plus largement un *réseau* électrique (Fig. 1.3).

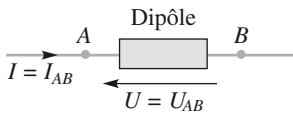


FIG. 1.2.

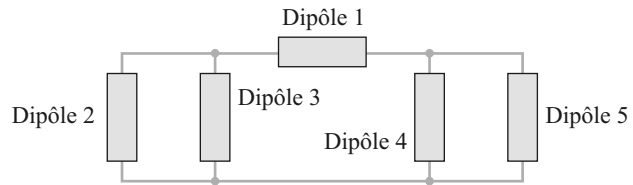


FIG. 1.3.

I.2. — Le dipôle considéré comme un système

En physique, un système est un dispositif capable de faire correspondre, à une grandeur physique, dite d'*entrée*, une autre grandeur physique, dite de *sortie*. On le caractérise par un opérateur $\mathcal{S}$ transformant la grandeur d'entrée e en la grandeur de sortie s :

$$s = \mathcal{S}\{e\}$$

Dans ce contexte, un dipôle est le système qui fait correspondre I à U et vice-versa. L'intérêt essentiel de ce point de vue est qu'il n'est pas nécessaire de connaître la constitution interne du composant ; la simple connaissance de la règle de correspondance entre l'entrée et la sortie suffit. En outre, une telle analyse est indépendante de l'évolution des technologies, puisqu'elle s'appuie sur la seule relation fonctionnelle.

I.3. — Puissance électrique reçue par un dipôle en régime stationnaire

La puissance électrique que peut dissiper un dipôle est un paramètre important de son fonctionnement, puisque sa prise en compte permet d'éviter sa détérioration, voire sa destruction. En outre, la plupart des appareils domestiques sont choisis en fonction de la puissance qu'ils consomment ; rappelons les ordres de grandeur des puissances consommées par quelques dipôles connus, respectivement une lampe de poche à incandescence, un téléviseur, une batterie de véhicule au démarrage et une

bouilloire électrique :

$$\mathcal{P}_{\text{lampe}} \sim 0,9 \text{ W} \quad \mathcal{P}_{\text{tv}} \sim 100 \text{ W} \quad \mathcal{P}_{\text{batterie}} \sim 1 \text{ kW} \quad \text{et} \quad \mathcal{P}_{\text{bouilloire}} \sim 2 \text{ kW}$$

La puissance électrique reçue par un dipôle électrocinétique AB , parcouru par un courant d'intensité $I = I_{AB}$, mesurée dans le sens A vers B , aux bornes duquel la tension est $U_{AB} = V_A - V_B$, V_A et V_B étant les potentiels pris à partir d'une référence commune, a pour expression (cf. *Électromagnétisme*) :

$$\mathcal{P} = U_{AB} I_{AB} = UI$$

En effet, le courant I , algébrique, correspond à un déplacement de charges. Pendant la durée élémentaire dt , la charge $dq = I dt$, pénètre en A dans le dipôle. Elle reçoit, lors de sa traversée de A vers B , le travail $\delta W = (V_A - V_B) dq$, soit la puissance $\mathcal{P} = \delta W / dt = UI$.

Le choix adopté ci-dessus, qui consiste à travailler avec la tension U_{AB} et l'intensité I_{AB} , est appelé *convention récepteur*, puisque U_{AB} et I_{AB} sont de même signe pour un dipôle recevant de la puissance.

D'après ce qui précède, la puissance fournie par le dipôle est l'opposée de celle qu'il reçoit :

$$\mathcal{P}_u = -\mathcal{P} = -U_{AB} I_{AB} \quad \text{soit aussi} \quad \mathcal{P}_u = U_{AB} I_{BA}$$

Lorsqu'on écrit la puissance sous cette dernière forme, on dit que l'on s'est placé en *convention générateur*. Effectivement, la puissance reçue par un générateur électrique est négative puisque la vocation de ce dernier est de fournir de la puissance électrique au circuit.

Par exemple, pour une lampe de poche, alimentée par une pile de force électromotrice $E = 4,5 \text{ V}$ et traversée par un courant d'intensité $I = 0,20 \text{ A}$, la puissance que fournit la pile au circuit extérieur est (Fig. 1.4) :

$$\mathcal{P}_u = EI = 4,5 \times 0,2 = 0,90 \text{ W}$$

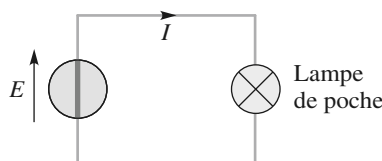


FIG. 1.4.

I.4. — Caractéristique d'un dipôle

a) Définition

Expérimentalement, on constate généralement que l'on ne peut imposer qu'une seule des deux grandeurs, U ou I . La relation entre elles, généralement écrite sous la forme $I(U)$, définit sa *caractéristique*.

Pour être précise, cette caractéristique doit être accompagnée de la convention choisie. Cette précision sera ici superflue, car, sauf indication contraire, nous adopterons *systématiquement*, comme en thermodynamique par exemple, la convention *récepteur*, c'est-à-dire que U désignera la tension U_{AB} et I l'intensité du courant I_{AB} .

b) Point de fonctionnement

La caractéristique d'un dipôle représente l'ensemble des états électriques possibles du dipôle. Cependant, l'une des deux grandeurs, I ou U , est imposée par les conditions d'utilisation, ce qui fixe l'autre. Le point correspondant sur la caractéristique est appelé *point de fonctionnement*. Il arrive souvent que l'on fasse varier la tension ou l'intensité du courant autour d'une certaine valeur ; le point de fonctionnement varie alors sur la caractéristique, dans le voisinage d'un point de fonctionnement moyen.

c) Obtention des caractéristiques

Il existe deux montages simples qui permettent de déterminer expérimentalement la caractéristique d'un dipôle, à l'aide d'un ampèremètre et d'un voltmètre.

Dans le premier, dit de *courte dérivation*, on mesure la tension aux bornes du dipôle, à l'aide d'un voltmètre, et l'intensité du courant qui traverse l'ensemble dipôle et voltmètre, grâce à un ampèremètre (Fig. 1.5a). Dans le second, dit de *longue dérivation*, le voltmètre donne la tension aux bornes du dipôle et de l'ampèremètre, alors que l'ampèremètre fournit l'intensité du courant qui traverse le seul dipôle (Fig. 1.5b).

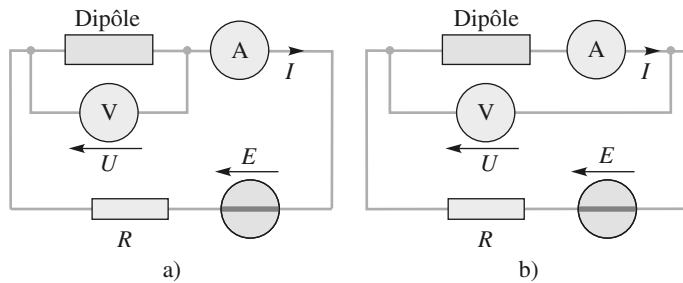


FIG. 1.5.

Les deux schémas permettent de comprendre ces deux dénominations : dans le premier cas la dérivation comportant le voltmètre est plus courte que dans le second. On trace point par point la caractéristique $I(U)$ en faisant varier la tension délivrée par le générateur.

Comme les instruments de mesure ne sont pas parfaits, les deux montages ne sont pas équivalents : l'ampèremètre introduit une résistance R_A , qui est faible devant toutes les autres, le voltmètre une résistance R_V au contraire grande comparée à toutes les autres. Cette imperfection fausse évidemment le relevé de la caractéristique, mais un choix judicieux du type de montage permet de minimiser cette erreur expérimentale systématique. Ainsi, le montage courte dérivation sera choisi lors du relevé de la caractéristique d'un composant de faible résistance interne, afin que le courant traversant le voltmètre soit négligeable devant celui traversant le dipôle étudié. De même, pour un dipôle de forte résistance interne, le montage longue dérivation conduit à une chute de tension aux bornes de l'ampèremètre négligeable devant la tension aux bornes du dipôle étudié (cf. Exercices).

Remarque : Évidemment, si les deux appareils de mesure sont parfaits, c'est-à-dire si la résistance interne de l'ampèremètre est nulle et la résistance interne du voltmètre infinie, la tension aux bornes de l'ampèremètre est nulle, ainsi que l'intensité du courant qui traverse le voltmètre ; les deux montages sont alors équivalents.

On rend automatique le relevé expérimental de la caractéristique à l'aide d'une interface d'acquisition reliée à un ordinateur, l'ensemble permettant d'assumer, à la fois le rôle du générateur et celui d'un multimètre (Fig. 1.6). Un logiciel de pilotage permet de paramétrer l'interface afin de déterminer la forme du signal à envoyer sur le circuit électrique, ici une rampe de tension, et d'enregistrer la tension aux bornes du dipôle, ainsi qu'une tension proportionnelle au courant qui le traverse. Avec ce même logiciel, on traite quelques centaines de points de mesure, ce qui permet de tracer la courbe $I(U)$ et de déterminer ses paramètres ; par exemple, la pente de la tangente à une courbe. La figure 1.7 représente la caractéristique d'une diode obtenue avec un montage muni d'un ordinateur, de son interface et d'un logiciel de pilotage.

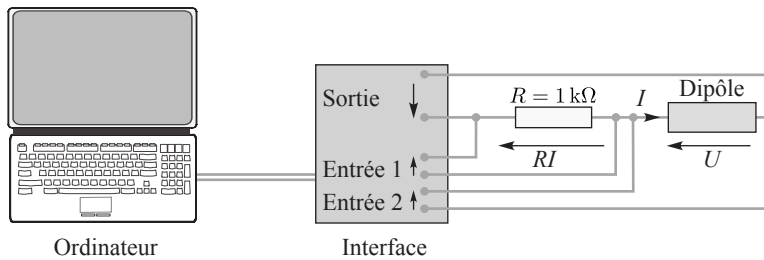


FIG. 1.6.

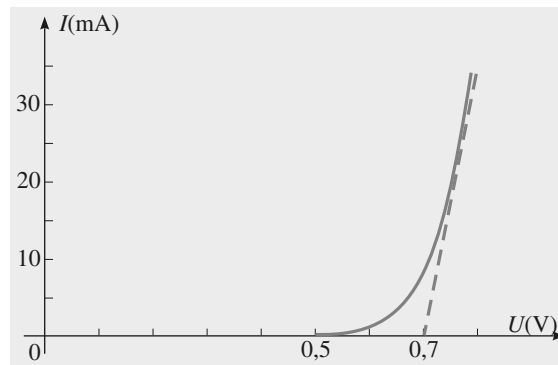


FIG. 1.7.

I.5. — Propriétés d'un dipôle

a) Dipôle passif

Un dipôle, et plus généralement un composant de circuit électrique, est dit *passif* s'il n'échange de l'énergie qu'avec le circuit auquel il est connecté (Fig. 1.8a). C'est le cas, par exemple, des résistors et des diodes à jonction.

Par extension, on appelle *circuit passif*, un circuit uniquement constitué de dipôles passifs.

b) Dipôle actif

Un dipôle, et plus généralement un composant de circuit électronique, est *actif* s'il échange de l'énergie avec le circuit *et* avec une *source auxiliaire* (Fig. 1.8b). C'est le cas des piles, alternateurs, photodiodes, amplificateurs opérationnels et transistors par exemple. L'énergie de la source auxiliaire peut donc être de nature diverse : chimique, mécanique, lumineuse, électrique, nucléaire, etc.

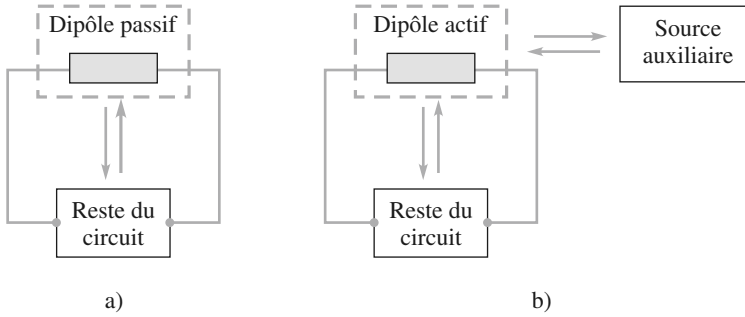


FIG. 1.8.

La source auxiliaire d'un amplificateur opérationnel est son alimentation, laquelle n'est généralement pas représentée sur les schémas électriques. Pour un transistor, la source auxiliaire est la source de polarisation, le plus souvent représentée sur les schémas électriques (cf. chapitre 7).

Par extension, on appelle *circuit actif*, un circuit comportant au moins un dipôle actif.

c) Dipôle récepteur

Un dipôle se comporte en *récepteur* lorsqu'il reçoit de la puissance du circuit. Le produit $\mathcal{P} = UI$ est positif et il fonctionne donc dans les quadrants 1 ou 3 de sa caractéristique (Fig. 1.9). Par exemple, un résistor, dont la caractéristique est entièrement contenue dans les quadrants 1 et 3 (Fig. 1.11a), fonctionne toujours en récepteur.

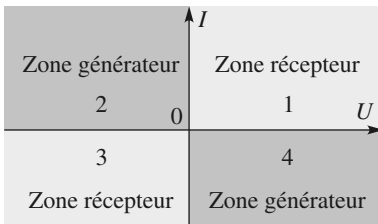


FIG. 1.9.

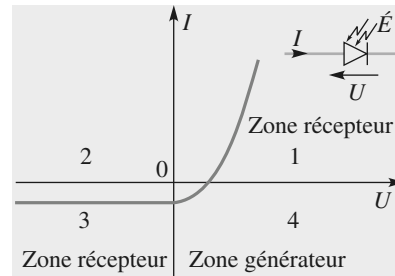


FIG. 1.10.

d) Dipôle générateur

Un dipôle se comporte en *générateur* lorsqu'il fournit de la puissance au circuit. Le produit $\mathcal{P} = UI$ étant négatif, son point de fonctionnement est situé dans les quadrants 2 ou 4 de sa caractéristique (Fig. 1.9).

Certains dipôles peuvent se comporter en récepteur ou en générateur, pouvant ainsi recevoir ou fournir de la puissance électrique, d'où l'intérêt d'adopter une seule convention avec des valeurs algébriques.

Sur la figure 1.10, on a représenté la caractéristique d'une photodiode en indiquant ses différents fonctionnements possibles. Dans les quadrants 1 et 3, c'est un *photorécepteur*; dans le quadrant 4, la photodiode se comporte comme un générateur électrique : c'est une *photopile*.

Dans ce même contexte, un dipôle actif peut dans certaines conditions se comporter en récepteur. Ainsi, la batterie d'un véhicule est un générateur électrique au démarrage, mais se comporte en récepteur

lorsqu'on la recharge, par l'intermédiaire de l'alternateur au cours du déplacement, ou d'un chargeur de batterie, si le véhicule est au repos.

e) Dipôle linéaire en régime stationnaire

En régime stationnaire, un dipôle est *linéaire* si l'intensité du courant qui le traverse est proportionnelle à la tension à ses bornes ; sa caractéristique est donc une droite passant par l'origine. C'est le cas d'un résistor (Fig. 1.11a).

Précisons que les dipôles dont la caractéristique est *rectiligne par morceaux*, c'est-à-dire constituée d'un ensemble de segments, ne possèdent pas cette propriété ; il en est ainsi pour un modèle simplifié de diode (Fig. 1.11b). De même, les dipôles, tels que ceux dotés d'une force électromotrice, par exemple les accumulateurs, ne sont pas linéaires, même si la relation $I(U)$ est affine, c'est-à-dire même si la caractéristique est une droite qui ne passe pas par l'origine (Fig. 1.11c).

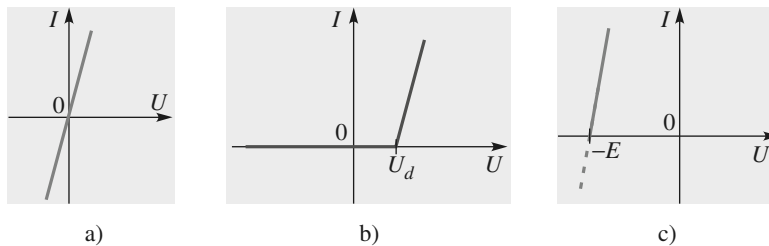


FIG. 1.11.

Remarque : Nous verrons ultérieurement pourquoi un circuit composé de dipôles linéaires et de générateurs à caractéristique affine peut se comporter comme un système linéaire (cf. chapitre 5).

f) Dipôle symétrique

Un dipôle est *symétrique* lorsque sa caractéristique $I(U)$ est une fonction impaire de U . Un tel dipôle n'a pas de sens de branchement, puisque son retournement ne modifie pas son comportement : changer U en $-U$ conduit à changer I en $-I$. Il en est ainsi pour un résistor (Fig. 1.11a).

II. — DIFFÉRENTS TYPES DE DIPÔLES

Nous présentons ici les principaux types de dipôles, sans toutefois donner les caractéristiques techniques précises de chacun d'entre eux, lesquels feront l'objet d'une étude détaillée ultérieure (cf. chapitres 7 et 11).

II.1. — Dipôles linéaires résistifs

a) Résistors

Un *résistor* est un dipôle récepteur qui satisfait à la loi d'Ohm, selon laquelle l'intensité du courant qui le traverse est proportionnelle à la tension à ses bornes (cf. *Électromagnétisme*) ; on l'appelle aussi *conducteur ohmique*. C'est le dipôle le plus utilisé.