16° V
22956

que sais-je ?

L'ÉLECTRONIQUE

RÉGIS DAVID



PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

2044240
62
Ne

QUE SAIS-JE ?

L'électronique

RÉGIS DAVID
Agrégé de l'Université
Docteur de 3e cycle. Docteur ès Sciences
Maître de Conférences de Sciences physiques
à l'Université Pierre-et-Marie-Curie

Neuvième édition corrigée

71e mille



16° V
22956

DL -8 SEP. 95 23955

DU MÊME AUTEUR

La conversion des énergies, coll. « Que sais-je ? », n° 1205, P.U.F., 2e éd., 1976.

Thermodynamique : à l'usage des élèves de propédeutique, licence ès sciences et écoles d'ingénieurs, C.D.U.

Guide de travaux pratiques de physique : à l'usage des candidats aux concours de l'enseignement, C.D.U.

Problèmes de mécanique quantique, traduction et adaptation d'après le livre de Ter HAAR, Paris, Masson.

Le vide, formation et contrôle des couches minces, avec la collaboration de A. RICHARDT, Monographie Dunod.

Chimie pratique à l'usage des étudiants aux C.A.P.E.S. et agrégation, avec la collaboration de J. BENOIT, Vuibert, 2e éd. revue et augmentée.

Revue Math.-Sciences. Travail de collaboration. A l'usage des classes de préparation aux grandes écoles et du premier cycle universitaire, 8 numéros par an, Vuibert.

Biophysique :

T. I : *Biophysique générale*, coll. « Biomed », P.U.F. (traduit en russe).

T. II (avec la collaboration de F. HENRY) : *Compléments et exercices*, coll. « Biomed », P.U.F.

Physique : Cours et exercices commentés, coll. « Biomed », P.U.F.

Informatique pratique (Programmes utilitaires), Ed. J.-M. Pierron, Sarreguemines 57206 (France).

ISBN 2 13 041844 9

Dépôt légal — 1re édition : 1964
9e édition corrigée : 1995, juin

© Presses Universitaires de France, 1964
108, boulevard Saint-Germain, 75006 Paris



PRÉFACE

Tout exposé sérieux d'un sujet scientifique exige de son auteur une série de choix. On écrit pour un public que l'on imagine doté de certaines connaissances et animé par certaines curiosités. Ces postulats admis, il faut ensuite sélectionner, parmi un nombre immense de faits, ceux qui semblent mériter d'être retenus. M. David a choisi de composer un ouvrage d'enseignement. Il admet que son lecteur possède la formation que donne en principe l'enseignement scientifique du second degré et qu'il désire acquérir les bases de la science de l'électronique. On ne trouvera donc pas ici une revue des applications nombreuses, ingénieuses et importantes d'une technique d'avant-garde, mais les fondements de ses mécanismes essentiels. M. David donne une large place aux schémas de montage et aux diagrammes. Il fait aussi appel à l'outil algébrique ; mais je ne vois guère qu'une formule — celle de Nyquist — qui soit donnée sans sa démonstration (laquelle dépasserait le niveau adopté). Ce petit ouvrage, dense et concis, se développe sans lacune logique, mais sans que le calcul obscurcisse la compréhension des phénomènes. Sa lecture sera certainement profitable aux élèves et aux étudiants qui abordent l'étude de cette branche de la Physique en plein essor.

J.-P. MATHIEU,

Professeur émérite à la Faculté des Sciences
de Paris.

INTRODUCTION

Ce petit livre n'a que la prétention de donner les notions de base indispensables à la compréhension de l'électronique. En une centaine de pages, il est très difficile d'entrer dans les détails, c'est pourquoi j'ai éliminé au maximum les développements mathématiques pour ne donner qu'un aspect qualitatif, souvent même intuitif, des problèmes physiques essentiels.

Deux années d'enseignement dans une classe de préparation aux Grandes Ecoles m'ont appris qu'il était beaucoup plus formateur de comprendre un phénomène que de résoudre un problème. L'utilisation des transistors est aujourd'hui plus importante que celle des lampes ; nous avons toutefois consacré plus de place aux lampes qu'aux transistors pour des raisons pédagogiques. Le lecteur qui possède parfaitement l'électronique des lampes peut passer au prix d'un effort faible mais très bénéfique à l'électronique des transistors, ce passage est facilité par le chapitre V ; c'est pourquoi j'ai voulu, dans ce livre, faire comprendre « ce qui se passe physiquement » et tout naturellement après — mais seulement dans un deuxième temps — le lecteur pourra trouver de l'intérêt et même un certain agrément à résoudre des problèmes.

Une bibliographie très sommaire donne au lecteur un choix de très bons ouvrages permettant d'approfondir certaines questions, mais je me fais un devoir de recommander tout particulièrement l'excellent livre de M. Robert Guillien, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique de Nancy. Ce livre, qui s'adresse à des lecteurs possédant déjà quelques bases d'électronique, est le complément indispensable de celui que je présente ici ; le manuel de M. Guillien, d'une lecture agréable et vivante, ne peut qu'être apprécié pour ses qualités pédagogiques.

Chapitre Premier

GÉNÉRALITÉS

Dans ce chapitre, nous commencerons par présenter les principales particules élémentaires, puis nous donnerons des indications sur la constitution des atomes ; ces indications sont indispensables pour la compréhension des phénomènes d'excitation et d'ionisation.

I. — Principales particules élémentaires

1. L'électron ou négaton. — L'étude des rayons cathodiques a conduit à admettre que ceux-ci étaient constitués par une grêle de particules électrisées, animées d'une vitesse assez grande — variable selon l'intensité du champ électrique accélérateur — mais toujours inférieure à la vitesse de la lumière qui est une vitesse limite.

Leur déviation par les champs électrique et magnétique a permis la mesure du rapport de la charge à la masse de ces particules qui se sont montrées négatives : pour cette raison, on les appelle négatons aussi bien qu'électrons.

Enfin les expériences de Millikan sur le mouvement d'une goutte d'huile électrisée en présence et en l'absence de champ électrique ont montré

que toute charge électrique était multiple d'une même charge élémentaire

$$e = -4{,}80.10^{-10} \text{ ues C.G.S.}$$
$$= -1{,}60.10^{-20} \text{ uem C.G.S.} = 1{,}6.10^{-19} \text{ coulombs}$$

La masse de l'électron est facile à connaître lorsqu'on a mesuré e/m et e. On trouve $m = 0{,}9.10^{-27}$ gramme.

L'étude de l'émission électronique par effet thermionique (ou thermoionique) à partir de différents métaux ainsi que de l'effet photoélectrique ont montré l'identité de tous les corpuscules émis, quels que soient leur provenance et leur mode d'extraction.

Les électrons sont des constituants universels de la matière.

2. **Le proton.** — Le plus simple des atomes, celui d'hydrogène, est constitué d'un noyau qui équilibre électriquement la charge de l'unique électron. On a pensé que ce noyau d'hydrogène était l'un des éléments constitutifs de tous les noyaux d'atomes plus lourds.

De nombreuses expériences ont montré l'exactitude de cette hypothèse.

Le noyau d'hydrogène a reçu le nom de proton, sa charge est identique à celle de l'électron $e = 4{,}8.10^{-10}$ ues C.G.S., mais positive (comme pour le positon) et sa masse vaut environ 1 836 fois celle de l'électron (alors que celle du positon est identique à celle de l'électron).

3. **Le neutron.** — Son existence a été prouvée par Chadwick en 1932. C'est une particule non chargée, dont la masse est à peu près égale à celle du proton. L'étude des propriétés des neutrons lors du bombardement des noyaux atomiques constitue

une branche importante de la physique nucléaire : la neutronique.

Le neutron est, comme le proton, un constituant des noyaux atomiques.

II. — Constitution des atomes

L'atome est la plus petite particule chimique qui puisse exister à l'état libre. Etymologiquement atome signifie insécable, or nous savons aujourd'hui que l'atome peut être sectionné en électrons, protons, neutrons, etc., mais chacune des particules obtenues après sectionnement n'est plus une particule chimique, c'est pourquoi nous avons défini l'atome comme la plus petite particule chimique pouvant exister.

L'atome a une structure organisée et complexe qui a été révélée peu à peu par l'étude de la diffraction des rayons X, des électrons et des neutrons, par la matière — d'une part —, par la spectroscopie — d'autre part.

En physique atomique, on caractérise un électron par 4 nombres dits quantiques :

— Le nombre quantique principal n : ce nombre entier indique le numéro de la « trajectoire » (couche) sur laquelle l'électron a la plus grande probabilité de se trouver. Les « trajectoires » ou couches électroniques sont numérotées à partir du noyau ; plus la valeur de n est grande, plus l'électron correspondant est éloigné du noyau.

L'habitude est telle que les couches ne sont pas repérées par des numéros, mais par des lettres $n = 1$, 2, 3, 4, ..., correspondant respectivement aux couches K, L, M, N, ..., cette notation tire son origine des spectres de rayons X. La couche K la plus proche du noyau vient du mot allemand Kern (en anglais Core).

— Le nombre quantique azimutal l : ce nombre est lié à l'excentricité de l'ellipse « trajectoire » sur laquelle l'électron a la probabilité la plus grande de se trouver.

Le nombre quantique azimutal vérifie la double inégalité :

$$0 \leqslant l \leqslant (n-1)$$

Le nombre l caractérise l'*état* d'un atome. Les états d'un atome sont repérés par les notations s, p, d, f, ..., qui tirent leur origine de la spectroscopie, d'après la série des raies correspondantes.

s = sharp (fine) ; p = principal (principale)
d = diffuse (diffuse) ; f = fundamental (fondamentale)

Lorsque des électrons ont les mêmes nombres quantiques n et l ils forment *un groupe*.

— Le nombre quantique magnétique m : ce nombre doit vérifier les inégalités

$$-l \leqslant m \leqslant +l$$

Il indique la quantification de l'orientation de l'atome dans un champ magnétique et joue un rôle fondamental dans l'effet Zeeman normal ou anormal.

Les 3 nombres quantiques n, l et m sont des nombres entiers : ils définissent *une orbitale*.

— Le nombre quantique de spin s : ce nombre caractérise la rotation de l'électron sur lui-même. C'est un nombre demi-entier, contrairement aux précédents ; il ne prend que les 2 valeurs $+\frac{1}{2}$ et $-\frac{1}{2}$.

D'après le principe d'exclusion de Pauli, deux électrons d'un même atome ne peuvent avoir leurs quatre nombres quantiques identiques.

Une orbitale est occupée au maximum par deux

électrons ; comme ceux-ci ne peuvent avoir le même nombre de spin, ces électrons sont antiparallèles et forment un doublet.

Quand un électron occupe seul une orbitale, il est appelé électron célibataire.

Chaque couche électronique peut recevoir au maximum $2\,n^2$ électrons, n étant le nombre caractérisant la couche :

Exemple :

couche K : 2 électrons ; couche L : 8 électrons
couche M : 18 électrons ; couche N : 32 électrons

Les couches situées au-delà de N sont toujours incomplètes par suite d'une anomalie de remplissage des couches dans le détail de laquelle nous n'entrerons pas. Les éléments correspondants sont appelés éléments de transition.

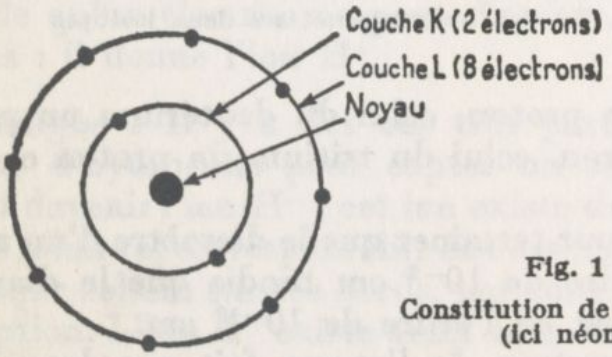


Fig. 1
Constitution de l'atome (ici néon)

Lorsque deux atomes ne diffèrent que par le nombre des neutrons contenus dans leur noyau, ils occupent la même place dans le tableau de Mendelejeef et pour cette raison portent le nom d'isotopes (d'après l'étymologie grecque).

Les isotopes ont été découverts par Aston grâce au spectrographe de masse. Deux isotopes ont mêmes propriétés chimiques et mêmes propriétés physiques liées aux électrons ; seules les propriétés

physiques liées au noyau diffèrent (par exemple la section efficace), ainsi évidemment que les propriétés de l'ensemble de l'atome (masse, densité, vitesse de diffusion, etc.). Pour illustrer cette notion, donnons l'exemple du plus simple et du plus connu des atomes : celui d'hydrogène ; la constitution de ses isotopes est représentée figure 2.

Le noyau de l'atome d'hydrogène ordinaire

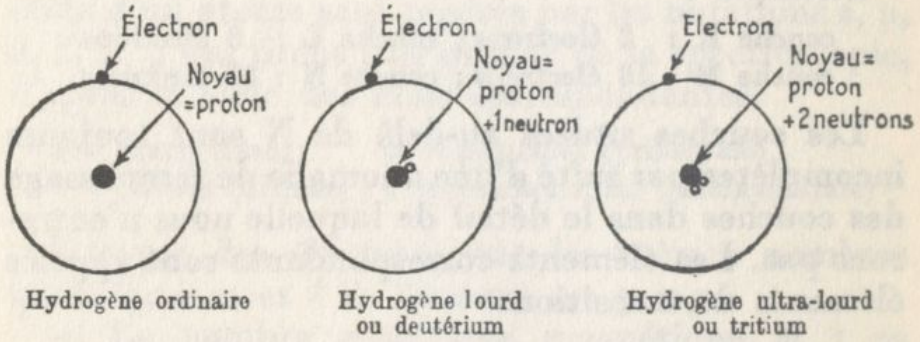


Fig. 2. — L'hydrogène et ses deux isotopes

contient un proton, celui du deutérium un proton et un neutron, celui du tritium un proton et deux neutrons.

Disons pour terminer que le diamètre d'un atome est de l'ordre de 10^{-8} cm tandis que le diamètre du noyau est de l'ordre de 10^{-13} cm.

Cette structure de l'atome fait que la matière — constituée par un ensemble de nombreux atomes identiques ou différents — est presque vide et explique par exemple que les électrons rapides peuvent traverser les très fines lamelles métalliques.

La structure de l'électron est totalement inconnue ; l'image, donnée en théorie classique, d'une petite sphère de rayon $r = \frac{2}{3}\frac{e^2}{m}$ où e est la charge et m la masse n'est certainement pas conforme à la réalité.

III. — Excitation et ionisation

La structure de l'atome montre qu'il est possible d'arracher un électron à la couche la plus externe à condition de dépenser une énergie suffisante. Il en résulte que l'atome possédera un excès de charge positive portée par son noyau : on a un ion (d'un mot grec signifiant voyageur car il est susceptible de se déplacer dans un champ électrique ou l'ensemble champ électrique + champ magnétique).

Nous voyons que lorsqu'un atome est ionisé, il y a séparation entre deux ou plusieurs particules :

— d'une part l'ion lorsque l'atome est une fois ionisé et d'autre part l'électron ;
— d'une part l'ion lorsque l'atome est deux fois ionisé et d'autre part deux électrons, et ainsi de suite. Seul l'atome d'hydrogène qui ne possède qu'un électron ne peut s'ioniser plus d'une fois : il donne l'ion H^+.

Remarque : Il y a des cas très particuliers où l'atome d'hydrogène peut capter un second électron et devenir l'ion H^- ; cet ion existe dans l'atmosphère solaire et est responsable de l'assombrissement du disque solaire sur ses bords, par suite de sa forte absorption. L'ion H^- existe aussi dans les composés appelés hydrures.

Lorsque l'énergie mise en jeu n'est pas suffisante pour ioniser un atome, c'est-à-dire pour arracher un électron, celui-ci peut néanmoins sauter d'une couche d'énergie E_1 à une couche d'énergie supérieure E_2 ; il est alors dans un état instable (dit aussi métastable) et il a tendance à revenir spontanément à l'état stable au bout d'un temps plus ou moins long.

Pendant ce retour l'électron émet une radiation électromagnétique de fréquence ν donnée par la

relation $E_2 - E_1 = h\nu$, h étant la constante de Planck ($h = 6{,}624.10^{-27}$ erg $\times$ s).

C'est à l'existence de ce phénomène en phase gazeuse qu'est due la luminescence accompagnant la décharge électrique dans les gaz.

IV. — Décharges électriques dans les gaz

On distingue trois régimes de décharge suivant la valeur de la tension appliquée :

1. Décharges non autonomes. — *a)* Quand le champ électrique est très faible, les seuls électrons qui peuvent exister sont créés par des effets indirects sur la cathode (effet photoélectrique, effet thermoionique, etc.) ; leur nombre est peu élevé et le courant qui en résulte est très faible ; d'ailleurs ce courant est encore limité par la rétrodiffusion, c'est-à-dire le retour des électrons sur la cathode.

Une autre cause de production d'électrons primaires extrêmement peu importante dans les conditions normales est l'ionisation dans le gaz lui-même par des agents extérieurs : rayonnement X, rayonnement γ de radioactivité, rayons cosmiques, etc.

Ces électrons sont attirés vers l'anode et l'aspect de la courbe pour les faibles potentiels de plaque présente un début de saturation (fig. 4).

b) Lorsque le champ électrique accélérateur croît par suite de l'augmentation de la tension plaque, l'énergie des électrons croît également et il se produit une multiplication du nombre d'électrons dans le gaz par ionisation des molécules. La théorie montre et l'expérience confirme que cette croissance est exponentielle ; il en résulte une deuxième portion de la courbe se raccordant à la précédente.

c) Si le potentiel croît encore, l'intensité du cou-