

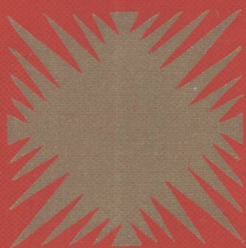
CHIMIE PHYSIQUE

II

ATOMISTIQUE ET LIAISON CHIMIQUE

PAR

J. GILBERT



MASSON & Cie

064
G465
V.1

7962261

5

CHIMIE PHYSIQUE

I

ATOMISTIQUE ET LIAISON CHIMIQUE

par

JACQUES GILBERT

Professeur à l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne
et au Centre Stéphanois
du Conservatoire National des Arts et Métiers.

PRÉFACE DU Pr G. CHAMPETIER



E7952261

MASSON ET C^{ie} ÉDITEURS

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS-VI^e

1963

*Tous droits de traduction,
d'adaptation et de reproduction
par tous procédés, y compris
la photographie et les microfilms,
réservés pour tous pays.*

© 1963 by Masson et C^{ie}
Éditeurs, Paris

(Printed in France).

CHIMIE PHYSIQUE

I

A LA MÊME LIBRAIRIE

Dans la même collection

et du même Auteur

CHIMIE PHYSIQUE. — Tome II. — *Thermodynamique chimique* (en préparation).

Tome III. — *Électrochimie* (en préparation).

Tome IV. — *Cinétique chimique* (en préparation).



7962261

PRÉFACE

L'ENSEIGNEMENT de la chimie physique a considérablement progressé depuis vingt ans : le nombre des chaires de chimie physique s'accroît dans les Facultés tandis que cet enseignement s'est imposé dans toutes les grandes écoles où la chimie constitue une part importante des programmes.

La chimie physique a cessé, en effet, d'être une discipline particulière, sorte de pont entre la chimie et la physique proprement dites. Elle se trouve à la base de tous les chapitres de la chimie, qu'il s'agisse de chimie minérale, de chimie organique ou même de chimie biologique. La chimie préparative conserve sans doute une place importante ; mais l'établissement de la constitution des corps, leur analyse, l'étude de leur structure, la compréhension de leurs mécanismes réactionnels ou de formation font appel de manière essentielle à la chimie physique. La plupart des minéralistes, des organiciens et des biochimistes sont devenus des physico-chimistes, aussi bien par leur esprit que par les méthodes de recherche qu'ils utilisent. On conçoit donc que l'enseignement de la chimie physique, prolongement de la chimie générale, soit devenu indispensable dans toutes les études de chimie qui ne sont pas uniquement descriptives.

Mais l'enseignement de la chimie physique fait appel à de bonnes connaissances de physique générale et à une formation mathématique qui, sans être très élevée, doit cependant être assez étendue. Il pouvait donc apparaître comme une gageure d'écrire un livre de chimie physique qui puisse servir à la fois aux élèves d'une grande école ayant le niveau mathématique nécessaire, comme c'est le cas pour les élèves de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, et à des lecteurs dont les études mathématiques ont été plus restreintes. Encouragé par l'expérience faite au Centre associé de Saint-Étienne du Conservatoire National des Arts et Métiers, dans le cadre de la Promotion Supérieure du Travail, M. Gilbert a entrepris cette œuvre difficile. Je crois pouvoir dire qu'il a réussi.

Il a pris soin de donner, en introduction, un rappel des notions indispensables pour aborder l'étude de l'atomistique, c'est-à-dire les formules relativistes fondamentales, les relations entre les systèmes d'unités M. K. S. A. rationalisé, C. G. S. électrostatique et C. G. S. électromagnétique, ainsi que les principales formules de l'électrostatique et de l'électromagnétisme, et

d'adjoindre à l'ouvrage, en annexe, un résumé des connaissances mathématiques utiles pour suivre convenablement le développement du cours : éléments de géométrie analytique, dérivées et différentielles, primitives, intégrales, développements en série, équations différentielles, éléments de géométrie vectorielle.

En possession de ces notions, ou en s'y reportant si cela lui est nécessaire, je suis persuadé, comme l'auteur, qu'un lecteur dont la formation mathématique est assez limitée pourra comprendre l'esprit de l'atomistique moderne, à la condition qu'il ait la volonté de faire l'effort d'assimilation indispensable. Cette volonté ne fait pas défaut aux bons éléments des cours du Conservatoire National des Arts et Métiers et de ses centres associés pour la Promotion Supérieure du Travail. Aussi convient-il de féliciter M. Gilbert de leur avoir permis de pénétrer dans un domaine qui pouvait leur paraître interdit.

M. Gilbert a eu recours, en outre, à une composition typographique variée pour signaler les parties du livre qui font appel à un niveau mathématique relativement élevé ou qui ne sont pas d'importance primordiale et qui peuvent être négligées éventuellement. En revanche, les faits et les résultats saillants sont signalés de façon particulière pour attirer l'attention du lecteur sur ce qu'il doit essentiellement retenir afin de poursuivre utilement sa tâche.

L'ouvrage de M. Gilbert traite de la partie de la Chimie physique qui est désignée sous le nom d'Atomistique et qui s'intéresse à la structure des atomes, aux liaisons chimiques, à la structure générale des molécules et aux interactions moléculaires. Il a fait précéder ces exposés par un important chapitre d'introduction sur les ondes et les corpuscules où il donne les éléments de Mécanique ondulatoire et les notions indispensables sur l'équation de Schrödinger qui sont les bases mêmes des développements ultérieurs. Il a tenu, avec raison, à introduire un court chapitre sur la constitution des noyaux atomiques, la radioactivité et la chimie nucléaire.

A un moment où la réforme des programmes est à l'ordre du jour et où les diverses formes d'enseignement cherchent leur équilibre et leurs relations souhaitables, l'ouvrage de M. Gilbert est un excellent exemple de la possibilité de donner un thème commun à un enseignement destiné à des étudiants de formations différentes, à la condition de bien sérier les difficultés, de prévenir l'étudiant de ce qui est compatible avec sa formation et de lui donner éventuellement la possibilité de la compléter. Je suis persuadé que le livre de M. Gilbert sera fort bien accueilli dans les Facultés des Sciences comme dans les Grandes Écoles et le cours de formation complémentaire supérieur. Je lui souhaite le succès qu'il mérite largement.

G. CHAMPETIER,
de l'Académie des Sciences.

AVANT-PROPOS

REFLET du cours de Chimie physique professé à l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, cet ouvrage s'adresse d'abord aux élèves des Grandes Écoles ainsi qu'aux étudiants de Chimie générale et même de Chimie physique; nous espérons que son étude les mettra en mesure d'aborder la lecture des publications spécialisées de Chimie théorique.

Mais ce cours est également professé avec succès au Conservatoire National des Arts et Métiers, centre associé de Saint-Étienne, et cette expérience a démontré qu'il était possible de dispenser une culture scientifique approfondie dans le cadre de la Promotion Supérieure du Travail, à la seule condition de compléter au fur et à mesure les connaissances mathématiques des auditeurs. Nous pensons donc que cet ouvrage sera utile aux meilleurs éléments du CNAM et c'est à leur intention que nous avons rédigé en annexe un résumé des connaissances mathématiques nécessaires.

Une typographie spéciale facilite de plus le travail, les paragraphes signalés par un trait ondulé en marge pouvant être omis en première lecture sans nuire à la compréhension générale du texte; il s'agit soit de questions secondaires, soit de développements d'un niveau mathématique relativement élevé.

Il nous reste enfin à nous excuser à l'avance pour les erreurs et omissions qui se sont vraisemblablement glissées dans notre texte.

École Nationale Supérieure des Mines,
Saint-Étienne, octobre 1962.



Renonçant à toute image précise du noyau, de l'atome ou de la molécule, le lecteur se gardera de transposer inconsidérément dans le monde des particules nucléaires ses concepts anthropomorphiques habituels, valables seulement à notre échelle.

Il se souviendra aussi qu'une théorie n'a jamais pour but de contenir la « réalité absolue » mais seulement de coordonner le maximum de faits expérimentaux.

« Le sens commun nous apprend que la Terre est fixe, que le Soleil tourne autour, et que les hommes qui vivent aux antipodes marchent la tête en bas. »

ANATOLE FRANCE.

RAPPEL DE NOTIONS DIVERSES

1. — Formules relativistes.

L'exposé de la théorie de la relativité restreinte sort évidemment du cadre d'un cours de Chimie générale. Certaines formules relativistes sont cependant d'un emploi constant dans l'étude de la structure de la matière et nous croyons utile de les énoncer, sans démonstration.

Équivalence masse-énergie. — Pour n'importe quel système matériel, tout accroissement d'énergie ΔW s'accompagne d'un accroissement de masse Δm tel que :

$$\Delta W = c^2 \cdot \Delta m \quad (0.1)$$

en désignant par c la vitesse de la lumière dans le vide, soit $3 \cdot 10^{10}$ cm/s. L'énormité du coefficient c^2 rend presque toujours insensibles les variations de masse et c'est pourquoi Lavoisier (1743-1794) a cru pouvoir énoncer le principe de conservation de la masse. En fait, la *masse et l'énergie sont deux aspects d'une même entité* et l'on doit réunir en un seul les principes de conservation de la masse et de conservation de l'énergie : toute diminution de masse correspond à une libération d'énergie et toute augmentation de masse à une absorption d'énergie par le système. Il en résulte que l'on peut très bien exprimer une énergie en unités de masse, ou une masse en unités d'énergie. La formule (0.1), due à Einstein (1879-1955), joue un rôle capital en physique et en chimie.

Variation de masse et énergie cinétique. — La formule (0.1) entraîne immédiatement que la masse m d'un système matériel en mouvement est toujours supérieure à sa masse au repos m_0 , l'énergie cinétique étant égale à la différence $(m - m_0) \cdot c^2$. Einstein a montré que m était lié à m_0 par la relation :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \rightarrow \quad W_{\text{cin}} = m_0 c^2 \left[\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (0.2)$$

v étant la vitesse relative du système par rapport à l'observateur qui mesure la masse m . Un système n'a donc pas la même masse pour des observateurs animés de vitesses différentes ; m_0 , masse au repos, correspond à un observateur lié au système en mouvement. On voit aussi que la *vitesse de la lumière c est la limite supérieure de toutes les vitesses matérielles observables v* , car la masse devient infinie et l'accélération nulle quelle que soit la force, quand v tend vers c .

RAPPEL DE NOTIONS DIVERSES

Naturellement, si v est petit par rapport à c , on peut faire un développement limité de $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$ et retrouver ainsi l'expression classique de l'énergie cinétique :

$$W_{\text{cin}} = (m - m_0)c^2 = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \sim \frac{m_0v^2}{2} \left(1 + \frac{3v^2}{4c^2} + \dots \right) \sim \frac{m_0v^2}{2}. \quad (0.3)$$

2. — Systèmes d'unités employées.

L'emploi du système MKSA rationalisé s'est largement répandu en Physique, les unités CGS précédemment utilisées étant généralement beaucoup trop petites pour les besoins pratiques. Il n'en est pas de même dans l'étude de la structure de la matière, les unités CGS étant déjà trop grandes quand il s'agit d'atomes ou de molécules.

C'est donc le système CGS es qui est universellement employé, même dans les publications les plus récentes. Nous croyons utile, en conséquence, d'indiquer la correspondance entre unités des deux systèmes et aussi entre formules (celles-ci diffèrent par le facteur $4\pi\epsilon_0$, en désignant par ϵ_0 la permittivité électrique du vide).

	Unité MKSA (rationalisé)	Sa valeur	
		en CGS es	en CGS em
Longueur	mètre (m)	10^2 cm	10^2 cm
Masse	kilogramme (kg)	10^3 g	10^3 g
Temps	seconde (s)	1 seconde	1 seconde
Force	newton (N)	10^5 dynes	10^5 dynes
Couple	joule par radian	10^7 ergs/r	10^7 ergs/r
Travail	joule (J)	10^7 ergs	10^7 ergs
Puissance	watt (W)	10^7 ergs/s	10^7 ergs/s
Pression	pascal ou N/m^2	10 baryes	10 baryes
Charge	coulomb (C)	$3 \cdot 10^9$ franklin	10^{-1}
Intensité	ampère (A)	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}
Potentiel	volt (V)	1/300	10^{-8}
Champ	volt/mètre (V/m)	1/30 000	10^{-6}
Résistance	ohm (Ω)	$1/9 \cdot 10^{11}$	10^{-9}
Capacité	farad (F)	$9 \cdot 10^{11}$	10^{-9}
Flux d'induction	weber (Wb)	1/300	10^8 maxwells
Induction magnétique	weber/m ² (Wb/m ²)	$1/3 \cdot 10^6$	10^4 gauss
Champ magnétique	ampère/m (A/m)	$12\pi \cdot 10^7$	$4\pi \cdot 10^{-3}$ oersted
Moment magnétique	ampère.m ² (A.m ²)	$1/3 \cdot 10^7$	10^3
Aimantation	ampère/m (A/m)	$1/3 \cdot 10^{13}$	10^{-3}
Masse magnétique	ampèremètre (A.m)	$1/3 \cdot 10^9$	10
Coefficient d'induction	henry (H)	$1/9 \cdot 10^{11}$	10^9
Force magnétomotrice	ampèretour	$12\pi \cdot 10^9$	$4\pi/10$ gilbert

ADDENDUM

Dans le chapitre « Rappel de Notions Diverses », à la page 4, avant le paragraphe « 2. — Systèmes d'unités employées » il y a lieu d'ajouter le texte ci-après :

Énergie, impulsion et vitesse. — Pour un mobile donné, c'est-à-dire pour une masse au repos m_0 donnée, l'énergie totale W est uniquement fonction des composantes p_x , p_y et p_z de l'impulsion $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$, et même plus exactement du seul module p de ce vecteur impulsion $\vec{p}$. Nous pouvons en effet éliminer la vitesse $v = |\vec{v}|$ entre les équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} W = m \cdot c^2 = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ p = m \cdot v = \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{array} \right.$$

et obtenir ainsi la relation fondamentale :

$$W^2 = m_0^2 \cdot c^4 + c^2 \cdot p^2 = m_0^2 \cdot c^4 + c^2 \cdot (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) \quad (0.4)$$

En différentiant membre à membre, on en déduit :

$$W \cdot dW = c^2 \cdot p \cdot dp = mc^2 \cdot v \cdot dp = W \cdot v \cdot dp.$$

Soit :

$$v = \frac{dW}{dp} \quad (0.5)$$

ou encore :

$$W.dW = c^2.(p_x.dp_x + p_y.dp_y + p_z.dp_z)$$

$$W.dW = mc^2.(v_x.dp_x + v_y.dp_y + v_z.dp_z)$$

$$dW = v_x.dp_x + v_y.dp_y + v_z.dp_z.$$

Soit :

$$v_x = \frac{\partial W}{\partial p_x}$$

$$v_y = \frac{\partial W}{\partial p_y}$$

$$v_z = \frac{\partial W}{\partial p_z}$$

(0.5 bis)

Les formules encadrées, relatives à la vitesse $\vec{v}$ ou à ses composantes, sont parfois employées en mécanique classique ; on voit qu'elles restent vraies en mécanique relativiste.

ERRATUM

Page 263, dans la formule figurant en haut de page :

$$\text{au lieu de : } \frac{F}{F_0} = \frac{M}{M_0} \cdot \frac{\left(\chi_s - \frac{\rho'}{\rho} \cdot \chi'_s \right)}{\left(\chi_{s0} - \frac{\rho'}{\rho_0} \cdot \chi'_s \right)}$$

$$\text{lire : } \frac{F}{F_0} = \frac{m}{m_0} \cdot \frac{\left(\chi_s - \frac{\rho'}{\rho} \cdot \chi'_s \right)}{\left(\chi_{s0} - \frac{\rho'}{\rho_0} \cdot \chi'_s \right)}$$

On notera enfin que la notion de diélectrique n'exprime que des apparences macroscopiques, car à l'échelle électronique, les charges se déplacent toujours dans le vide : l'induction électrique disparaît pour faire place au champ qui, seul, conserve un sens à cette échelle. Il en est de même pour l'induction et le champ magnétiques. Le problème réside dans l'évaluation exacte du champ local. L'un des inconvénients majeurs du système CGS, à savoir favoriser les confusions entre champ et induction, disparaît pratiquement en microphysique.

3. — Rappel des principales formules de l'électrostatique.

Le système CGS es, employé dans ce cours, pose en principe que la permittivité électrique du vide ϵ_0 est égale à l'unité, ce qui définit une unité de charge, le franklin. Dans le système MKSA rationalisé, le coulomb est défini à partir d'autres considérations et on en tire ϵ_0 . Les principales formules ont été écrites ci-dessous dans les deux systèmes, en désignant par $\vec{E}$, $\vec{D}$ et $\vec{P}$ les vecteurs champ, induction et polarisation, par ϵ et χ' la permittivité et la susceptibilité diélectriques du milieu (ϵ s'appelle aussi constante diélectrique).

CGS es	MKSA rationalisé
Permittivité du vide $\epsilon_0 = 1$	Permittivité du vide $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}$
$F = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{qq'}{r^2}$	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{qq'}{r^2}$
$V = \frac{1}{\epsilon} \cdot \sum \left(\frac{q}{r} \right)$	$V = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \sum \left(\frac{q}{r} \right)$
$E = - \text{grad } V$	$E = - \text{grad } V$
$\begin{cases} \vec{D} = \vec{E} + 4\pi\vec{P} \\ \text{rot } \vec{E} = 0 \\ \text{div } \vec{D} = 4\pi\rho \end{cases}$ avec : $\begin{cases} \vec{P} = \chi' \vec{E} \\ \vec{D} = (1 + 4\pi\chi') \cdot \vec{E} = \epsilon \vec{E} \end{cases}$	$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \\ \text{rot } \vec{E} = 0 \\ \text{div } \vec{D} = \rho \end{cases}$ avec : $\begin{cases} \vec{P} = \chi' \epsilon_0 \vec{E} \\ \vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi') \cdot \vec{E} = \epsilon \vec{E} \end{cases}$
Distribution fictive équivalente à la polarisation d'un diélectrique $(\rho' = - \text{div } \vec{P}, \sigma' = P_n)$	Distribution fictive équivalente à la polarisation d'un diélectrique $(\rho' = - \text{div } \vec{P}, \sigma' = P_n)$
Equation de Poisson : $\Delta V = - \frac{4\pi\rho}{\epsilon}$	$\Delta V = - \frac{\rho}{\epsilon}$
Energie du champ : $W = \iiint \frac{\epsilon E^2}{8\pi} \cdot d\nu$	$W = \iiint \frac{\epsilon E^2}{2} \cdot d\nu$

4. — Rappel des principales formules de l'électromagnétisme.

Le système CGS em est encore très employé en microphysique et notamment son unité d'induction magnétique, le gauss ; il est donc utile de comparer ici les systèmes CGS em et MKSA rationalisé : le système CGS em pose en principe que la perméabilité du vide μ_0 est égale à l'unité, alors que $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ en MKSA

CGS em	MKSA rationalisé
Perméabilité du vide : $\mu_0 = 1$ action d'un champ sur un courant : $d\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \wedge \vec{\mathcal{B}})$ ou $d\vec{F} = i \cdot (d\vec{l} \wedge \vec{\mathcal{B}})$ champ d'un élément de courant : $d\vec{\mathcal{B}} = \mu q \cdot \frac{(\vec{v} \wedge \vec{r})}{ r ^3}$ ou $d\vec{\mathcal{B}} = \mu i \cdot \frac{(d\vec{l} \wedge \vec{r})}{ r ^3}$	Perméabilité du vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ $d\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \wedge \vec{\mathcal{B}})$ ou $d\vec{F} = i \cdot (d\vec{l} \wedge \vec{\mathcal{B}})$ champ d'un élément de courant : $d\vec{\mathcal{B}} = \frac{\mu q}{4\pi} \cdot \frac{(\vec{v} \wedge \vec{r})}{ r ^3}$ ou $d\vec{\mathcal{B}} = \frac{\mu i}{4\pi} \cdot \frac{(d\vec{l} \wedge \vec{r})}{ r ^3}$
$\begin{cases} \vec{\mathcal{B}} = \mu \cdot \vec{\mathcal{H}} \\ \text{rot } \vec{\mathcal{H}} = 4\pi \cdot \vec{\delta} \\ \text{div } \vec{\mathcal{B}} = 0 \end{cases}$ avec : $\begin{cases} \vec{\mathcal{J}} = \frac{d\vec{m}}{d\nu} = \chi \cdot \vec{\mathcal{H}} \\ \vec{\mathcal{B}} = \vec{\mathcal{H}} + 4\pi \vec{\mathcal{J}} = (1 + 4\pi\chi) \vec{\mathcal{H}} = \mu \vec{\mathcal{H}} \end{cases}$	$\vec{\mathcal{B}} = \text{rot } \vec{A} \text{ avec } \vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \iiint \frac{\vec{\delta}}{r} \cdot d\nu$ $\begin{cases} \vec{\mathcal{B}} = \mu \cdot \vec{\mathcal{H}} \\ \text{rot } \vec{\mathcal{H}} = \vec{\delta} \\ \text{div } \vec{\mathcal{B}} = 0 \end{cases}$ avec : $\begin{cases} \vec{\mathcal{J}} = \frac{d\vec{m}}{d\nu} = \chi \cdot \vec{\mathcal{H}} \\ \vec{\mathcal{B}} = \mu_0 (\vec{\mathcal{H}} + \vec{\mathcal{J}}) = \mu_0 (1 + \chi) \cdot \vec{\mathcal{H}} = \mu \vec{\mathcal{H}} \end{cases}$
Distribution fictive (ρ', σ') équivalente à l'aimantation des substances $\rho' = -\text{div } \vec{\mathcal{J}}$ et $\sigma' = \mathcal{J}_n$ $V = \iiint \frac{\rho' \cdot d\nu}{r} + \iint \frac{\sigma' \cdot dS}{r}$ $\vec{\mathcal{H}} = -\text{grad } V$	$\rho' = -\text{div } \vec{\mathcal{J}}$ et $\sigma' = \mathcal{J}_n$ $V = \frac{1}{4\pi} \iiint \frac{\rho' \cdot d\nu}{r} + \frac{1}{4\pi} \cdot \iint \frac{\sigma' \cdot dS}{r}$ $\vec{\mathcal{H}} = -\text{grad } V$
Energie localisée dans le champ	
$W = \iiint \frac{\mu \cdot \mathcal{H}^2}{8\pi} \cdot d\nu$	$W = \iiint \frac{\mu \cdot \mathcal{H}^2}{2} d\nu$
$\mathcal{E} = i \cdot \Delta \Phi_{\mathcal{B}}$ (variation du flux) $\mathcal{E} = i \cdot \varphi_{\mathcal{B}}$ (flux coupé) $e = -\frac{d\Phi_{\mathcal{B}}}{dt}$ (loi de Lenz) $\text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{\mathcal{B}}}{dt}$	$\mathcal{E} = i \cdot \Delta \Phi_{\mathcal{B}}$ (variation du flux) $\mathcal{E} = i \cdot \varphi_{\mathcal{B}}$ (flux coupé) $e = -\frac{d\Phi_{\mathcal{B}}}{dt}$ (loi de Lenz) $\text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{\mathcal{B}}}{dt}$

rationalisé. Nous désignons par $\vec{B}$, $\vec{E}$ et $\vec{J}$ les vecteurs induction, champ et aimantation, par χ et μ la susceptibilité et la perméabilité magnétiques et enfin par $\vec{\delta}$ le vecteur densité de courant.

En fait, dans les formules de la dernière partie du tableau de la page 6 on n'emploie jamais le système CGS : on garde l'unité CGS em de flux d'induction, c'est-à-dire le maxwell, mais on exprime toujours le travail en joules, l'intensité en ampères et la fem en volts. Les formules en question deviennent alors :

$$\mathcal{E} = 10^{-8} \cdot i \Delta \Phi_B = 10^{-8} \cdot i \cdot \varphi_B$$

$$e = -10^{-8} \frac{d\Phi}{dt}.$$

Compte tenu du fait qu'un weber vaut 10^8 maxwells cela revient à utiliser implicitement le système MKSA dont la supériorité est ici évidente.

5. — Unités courantes d'énergie.

Unité	Sa valeur en ...							
	erg	joule	KWh	calorie	eV	MeV	uma	gramme
erg . . .	1	10^{-7}	$2,78 \cdot 10^{-14}$	$2,39 \cdot 10^{-8}$	$6,25 \cdot 10^{11}$	$6,25 \cdot 10^5$	669	$1,11 \cdot 10^{-21}$
joule . . .	10^7	1	$2,78 \cdot 10^{-7}$	0,239	$6,25 \cdot 10^{18}$	$6,25 \cdot 10^{12}$	$6,69 \cdot 10^9$	$1,11 \cdot 10^{-14}$
KWh . . .	$3,60 \cdot 10^{13}$	$3,60 \cdot 10^6$	1	$8,63 \cdot 10^5$	$2,26 \cdot 10^{25}$	$2,26 \cdot 10^{19}$	$2,41 \cdot 10^{16}$	$4,00 \cdot 10^{-8}$
calorie . . .	$4,18 \cdot 10^7$	4,18	$1,16 \cdot 10^{-6}$	1	$2,62 \cdot 10^{19}$	$2,62 \cdot 10^{13}$	$2,80 \cdot 10^{10}$	$4,65 \cdot 10^{-14}$
électron-volt . . .	$1,60 \cdot 10^{-12}$	$1,60 \cdot 10^{-19}$	$4,45 \cdot 10^{-26}$	$3,82 \cdot 10^{-20}$	1	10^{-6}	$1,07 \cdot 10^{-9}$	$1,78 \cdot 10^{-33}$
MeV . . .	$1,60 \cdot 10^{-6}$	$1,60 \cdot 10^{-13}$	$4,45 \cdot 10^{-20}$	$3,82 \cdot 10^{-14}$	10^6	1	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$1,78 \cdot 10^{-27}$
uma . . .	$1,49 \cdot 10^{-3}$	$1,49 \cdot 10^{-10}$	$4,15 \cdot 10^{-17}$	$3,55 \cdot 10^{-11}$	$9,31 \cdot 10^8$	931	1	$1,66 \cdot 10^{-24}$
gramme . . .	$9 \cdot 10^{20}$	$9 \cdot 10^{13}$	$2,50 \cdot 10^7$	$2,15 \cdot 10^{13}$	$5,62 \cdot 10^{32}$	$5,62 \cdot 10^{26}$	$6,02 \cdot 10^{23}$	1
litre atmosphère . . .	$101,3 \cdot 10^7$	101,3		24,20				
kilogram-mètre . . .	$9,81 \cdot 10^7$	9,81	$2,76 \cdot 10^{-6}$	2,34				

6. — Valeurs de quelques constantes universelles.

	Valeur	Unité
Vitesse de la lumière c	$2,997\ 93 \cdot 10^{10}$	cm/s
Constante de Planck h	$6,625\ 2 \cdot 10^{-27}$	erg.s
Constante réduite de Planck $\frac{h}{2\pi}$	$1,054\ 2 \cdot 10^{-27}$	erg.s/rad
Charge de l'électron e	$4,802\ 2 \cdot 10^{-10}$ $1,601\ 9 \cdot 10^{-19}$	ues CGS coulombs
Masse de l'électron m_0	$9,108\ 3 \cdot 10^{-28}$ $5,487\ 5 \cdot 10^{-4}$	grammes uma
Charge spécifique e/m_0	$5,273\ 0 \cdot 10^{17}$ $1,758\ 9 \cdot 10^{11}$	ues CGS c/kg
Nombre d'Avogadro N	$6,025\ 4 \cdot 10^{23}$	
Constante de Boltzmann k	$1,380\ 3 \cdot 10^{-16}$	erg/°K
Constante des gaz parfaits R	$8,316 \cdot 10^7$ $1,986$	erg/°K/mole cal/°K/mole
Constante de Rydberg R	$109\ 737,31$	cm ⁻¹
« Rayon » de l'atome d'hydrogène a_0	$0,529\ 17 \cdot 10^{-8}$	cm