L'INERTIE DE L'ÉNERGIE ET SES CONSÉQUENCES [1].

La notion de masse, fondamentale en mécanique, peut être introduite de trois manières différentes qui correspondent à trois aspects du phénomène d'inertie. On peut définir la masse : 1° comme coefficient de proportionnalité de la force à l'accélération; 2° comme capacité d'impulsion ou de quantité de mouvement; 3° comme capacité de force vive ou d'énergie cinétique.

La mécanique rationnelle exige qu'il y ait coïncidence entre ces diverses définitions et admet de plus l'invariabilité absolue de la masse pour une même portion de matière à travers tous les changements que celle-ci peut subir : physiques, chimiques ou mécaniques (mouvement plus ou moins rapide).

1. La masse, coefficient d'inertie. — On entend d'ordinaire par inertie la propriété que possède la matière de tendre à conserver le mouvement acquis: elle résiste aux changements de sa vitesse, de sorte qu'une action extérieure ou force est nécessaire pour modifier la grandeur ou la direction de celle-ci.

Newton admit qu'il y a proportionnalité entre la force agissant sur un corps et le changement de vitesse qu'elle lui communique, par unité de temps, ou accélération; le quotient constant de ces deux grandeurs lui servit à définir la masse du corps. Il résulte nécessairement de la loi fondamentale admise par Newton (indépendance des effets des forces et du mouvement antérieurement acquis), que l'accélération est toujours dirigée suivant la force qui la produit, quelle que soit sa direction par rapport à la vitesse acquise, qu'elle soit longitudinale (accélération tangentielle), transversale (accélération normale) ou oblique à la trajectoire.

2. La masse, capacité d'impulsion. — A chaque portion de matière, à chaque point matériel en mouvement, on peut faire correspondre une grandeur dirigée, son *impulsion* G, nulle au repos et dont, par définition, *la variation par unité de temps est donnée en grandeur et direction par la force résultante qui agit sur cette portion de matière.* Autrement dit, l'impulsion communiquée par une force f pendant le temps dt étant définie, en grandeur et direction, par le produit $f\,dt$, *l'impulsion d'un corps* est par définition la somme géométrique des impulsions élémentaires qui lui ont été communiquées à partir du repos par les différentes forces exercées sur lui.

Pour un système de corps, susceptibles en général d'agir les uns sur les autres, l'impulsion totale est définie comme somme géométrique des impulsions individuelles. Il résulte du principe d'égalité de l'action et de la réaction que si le système est fermé, soustrait à toute action extérieure, cette impulsion totale reste invariable, se conserve au cours du temps. Elle ne change pas, bien que

[1] Conférence faite à la Société française de Physique le 26 mars 1913.

les impulsions individuelles des parties du système changent en raison des forces qu'elles exercent les unes sur les autres.

Il résulte de la loi d'inertie que l'impulsion G subie par un corps à partir du repos est égale à sa quantité de mouvement, c'est-à-dire au produit de sa masse par sa vitesse et dirigée suivant celle-ci, d'où la relation vectorielle :

$$G = mv.$$

On pourrait aussi définir la masse par cette relation, comme *capacité d'impulsion,* comme quotient de l'impulsion par la vitesse (masse maupertuisienne de H. Poincaré). On peut encore dire capacité de quantité de mouvement, si l'on considère cette dernière expression comme synonyme d'impulsion.

J'insiste sur ce point que le principe de conservation de l'impulsion ou quantité de mouvement totale *portée par la matière* dans un système fermé est une conséquence du principe d'égalité de l'action et de la réaction et cesserait d'être exact en même temps que celui-ci.

3. La masse, capacité d'énergie cinétique. — De même que la notion d'impulsion communiquée par une force conduit à énoncer le principe de conservation de la quantité de mouvement, la notion de travail a conduit à énoncer, sous une forme de plus en plus générale, le principe de conservation de l'énergie.

Par définition, *l'énergie cinétique d'un point matériel en mouvement est égale à la somme algébrique des travaux des forces qui ont agi sur lui à partir du repos.* S'il s'agit d'un corps de dimensions finies, cette définition ne subsiste sans modification que si la mise en mouvement ne s'est accompagnée d'aucune déformation, que si le corps est resté le même pour des observateurs qui lui sont liés. On remarquera qu'il n'est nécessaire d'introduire aucune restriction de ce genre dans la définition donnée plus haut de l'impulsion : nous verrons que la même simplicité se retrouve dans la relation de la masse à l'énergie quand on fait intervenir l'énergie *totale* du corps en mouvement au lieu de l'énergie cinétique.

En attendant, nous définirons comme d'habitude l'énergie cinétique w d'un corps par le travail total qu'il faut dépenser pour amener dans son état de mouvement actuel ce corps, pris au repos *dans sa configuration actuelle.*

On a, dans ces conditions, en mécanique rationnelle, si m est la masse du corps et v sa vitesse :

$$w = \frac{1}{2} mv^2.$$

On pourrait aussi utiliser cette relation pour définir la masse comme *capacité d'énergie cinétique,* comme quotient du double de l'énergie cinétique ou force vive par le carré de la vitesse (masse cinétique de H. Poincaré).

4. L'inertie, propriété fondamentale, et le mécanisme. — Depuis Newton on admet, et c'est ainsi que débutent tous les traités de physique, que l'inertie est une propriété fondamentale de la matière dont l'existence ne saurait se ramener à des phénomènes plus simples, et doit au contraire être acceptée comme principe d'explication. On a même considéré pendant plus de deux

siècles, et c'est là l'essentiel de la doctrine mécaniste, qu'un phénomène physique ne peut être expliqué complètement qu'après avoir été amené à des mouvements régis par les lois de la mécanique rationnelle, et en particulier par la loi d'inertie.

Malgré la perfection de sa forme et les services séculaires qu'il a rendus, nous ne pouvons plus aujourd'hui conserver l'édifice de la dynamique newtonienne où l'inertie, mesurée par une masse invariable, intervient comme support principal.

L'inertie n'est plus une propriété fondamentale, puisqu'il est possible d'en rendre compte, pour une partie au moins, à partir des lois de l'électromagnétisme, probablement plus primitives et plus simples. La masse n'est plus invariable, puisque ses diverses définitions cessent de coïncider quand la vitesse de la matière cesse d'être petite par rapport à celle de la lumière et qu'elles conduisent toutes trois, pour une même portion de matière, à des valeurs variables en fonction de la vitesse, suivant trois lois différentes.

Il y a plus encore : au voisinage du repos, pour des vitesses faibles, les trois définitions coïncident et conduisent pour une portion donnée de matière à une certaine *masse initiale* m_0 ; mais *cette masse initiale dépend de l'état physique ou chimique du système et varie pour toute modification accompagnée d'un échange d'énergie avec l'extérieur,* par rayonnement, par exemple.

Nous serons amenés à conclure que tout accroissement ΔE de l'énergie totale d'un corps en repos ou en mouvement se traduit par un accroissement proportionnel Δm de sa masse, suivant la relation remarquablement simple :

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{V^2},$$

V représentant la vitesse de la lumière dans le vide. La masse d'un corps, même pour les vitesses faibles, ne reste constante que dans la mesure où l'énergie interne ne change pas.

Dans un système isolé dont les diverses parties échangent de l'énergie entre elles, les masses individuelles ne se conservent pas ; seule la masse de l'ensemble reste invariable à condition que le système ne reçoive ni ne perde au total d'énergie.

La conservation de la masse cesse d'être un principe distinct ; elle vient se confondre avec la conservation de l'énergie.

Ne semble-t-il pas que notre édifice aura gagné en simplicité et en harmonie à cette unification de deux principes considérés d'abord comme indépendants? Le dernier en date, et le plus péniblement atteint par des généralisations successives, celui de l'énergie, nous apparaît maintenant comme étant beaucoup plus fondamental et plus riche que l'autre, réduit à n'en être plus qu'un des aspects.

Il est bien entendu, d'ailleurs, que les écarts à partir des résultats donnés par la mécanique rationnelle ne deviennent sensibles que dans des circonstances exceptionnelles.

La Mécanique conserve sa haute valeur pratique dans toutes les circonstances où il ne s'agit, ni de vitesses supérieures à 30 000 km par s, ni de changements d'état mettant en jeu des énergies énormes, comme ceux dont sont le siège les corps radioactifs ou ceux qui ont dû accompagner la formation des atomes. Ces réserves faites, on peut considérer la masse comme invariable et les équations de la dynamique comme exactes. La mécanique rationnelle aura seulement perdu la puissance explicative qui faisait sa suprématie et restera comme première approximation presque toujours suffisante.

5. L'inertie électromagnétique. — L'insuffisance du mécanisme s'est manifestée nettement lorsqu'on s'est efforcé sans succès d'en tirer une explication des phénomènes électromagnétiques et optiques.

Nous voyons aujourd'hui la raison profonde de ces difficultés dans le fait que les équations de la dynamique, d'une part, et celles de l'électromagnétisme d'autre part, ne font pas intervenir les mêmes conceptions de l'espace et du temps; il semble bien que celle de l'électromagnétisme est la plus correcte et que l'autre, celle de la mécanique rationnelle, n'a que la valeur d'une première approximation. Il a donc paru beaucoup plus fécond, depuis une dizaine d'années, de chercher une interprétation électromagnétique de l'inertie plutôt qu'une explication mécanique des lois de l'électro-magnétisme; ces dernières ont un caractère de grande simplicité qui les qualifie pour servir de base à la physique et de principe d'explication. Bien que nous soyons encore loin de pouvoir même affirmer qu'une telle synthèse électromagnétique est possible, l'effort tenté pour la constituer et le changement de point de vue qu'il implique se sont déjà montrés très riches de conséquences et d'aperçus nouveaux, dont je voudrais signaler quelques-uns.

La première indication d'une possibilité d'expliquer l'inertie a été donnée en 1881 par J.-J. Thomson, vers sa vingtième année. Plein des idées de Maxwell, qu'on respirait à Cambridge, il comprit que le fait pour un corps d'être électrisé lui communique une inertie particulière d'origine électromagnétique. Cela résulte de la loi du courant de convection, de la propriété que possède un corps électrisé de créer un champ magnétique autour de lui, quand il est en mouvement. Nous pouvons actuellement considérer comme un fait expérimental cette propriété déduite par Maxwell des équations qu'il a établies et qui ont servi de base aux calculs de Thomson.

Les expériences de Rowland et de ses élèves ont vérifié en effet de manière qualitative et quantitative cette conséquence de la théorie : un corps électrisé, une sphère par exemple, de rayon a et de charge e, se mouvant uniformément avec la vitesse v, crée autour de lui un champ magnétique distribué en lignes de forces circulaires ayant leur plan normal à la direction de la vitesse et centrées sur la trajectoire du centre de la sphère.

Autrement dit, le champ magnétique en un point A est normal au plan Aov qui passe par le point A et la trajectoire du centre et a pour grandeur, au moins *tant que la vitesse v est assez petite par rapport à la vitesse de la lumière* V :

$$H = \frac{ev \sin \alpha}{r^2}. \tag{1}$$

Si la sphère est chargée seulement en surface, elle ne produit aucun champ magnétique à son intérieur, pas plus que de champ électrique, et la formule (1) n'est valable que pour $r > a$.

D'autre part, l'extension aux phénomènes électromagnétiques du principe de conservation de l'énergie exige, comme on le sait, que la production d'un champ électrique h dans un milieu de pouvoir inducteur spécifique K représente une dépense d'énergie localisée dans le milieu à raison de $\frac{Kh^2}{8\pi}$ par unité de volume et que la production d'un champ magnétique H dans un milieu de perméabilité constante μ représente de même une localisation d'énergie avec la densité $\frac{\mu H^2}{8\pi}$.

Pour trouver les énergies électrique W_e et magnétique W_m localisées dans une portion du milieu d'étendue finie, il faut, $d\tau$ représentant un élément de volume, calculer dans cette étendue, les intégrales :

$$W_e = \int \frac{Kh^2}{8\pi}\, d\tau \qquad \text{et} \qquad W_m = \int \frac{\mu H^2}{8\pi}\, d\tau.$$

On déduit facilement de là que, conformément à un résultat bien connu d'électrostatique, le champ électrique entourant notre sphère de charge superficielle e et de rayon a (supposée dans le vide, de pouvoir inducteur K_0 et de perméabilité μ_0) représente au repos une énergie potentielle électrostatique :

$$W_0 = \frac{e^2}{2K_0 a}. \tag{2}$$

Lorsque la sphère est en mouvement avec une vitesse faible par rapport à celle de la lumière, ce champ électrique reste distribué comme au repos et accompagne la sphère dans son mouvement : celle-ci emporte avec elle sa chevelure de lignes de force radiales symétriquement disposées autour d'elle; l'énergie électrostatique, constante aussi longtemps que la vitesse reste faible, se déplace ainsi avec la charge.

Mais ce déplacement du champ électrique implique, d'après l'expérience de Rowland, la production d'un champ magnétique entourant le corps électrisé et l'accompagnant aussi dans son mouvement. Ce champ, proportionnel à la vitesse en vertu de la loi du courant de convection (1) représente une énergie proportionnelle au carré de la vitesse, et qu'un calcul facile basé sur l'expression de la densité en volume $\frac{\mu_0 H^2}{8\pi}$ montre égale à :

$$W_m = \frac{\mu_0 e^2}{3a} v^2. \tag{3}$$

Cette énergie doit être fournie, au moment où la sphère chargée est mise en mouvement, par les actions extérieures qui lui communiquent la vitesse v. Elle lui reste liée au long de son parcours, et doit être restituée au moment de l'arrêt sous forme de travail fourni contre les actions retardatrices. Ces échanges de travail laissent d'ailleurs, malgré la mise en mouvement ou l'arrêt, le corps électrisé identique à lui-même pour des observateurs qui lui sont liés, puisqu'il reste, pour ceux-ci, entouré uniquement de son champ électrostatique [1].

L'énergie W_m présente donc tous les caractères d'une énergie cinétique, y compris celui d'être proportionnelle au carré de la vitesse, et correspond à l'existence d'une masse cinétique, d'une inertie supplémentaire d'origine électromagnétique :

$$(4) \qquad m_0 = \frac{2\,\mu_0 e^2}{3a}$$

résultant uniquement du fait que la sphère est électrisée et s'ajoutant à l'inertie que celle-ci peut représenter d'autre part.

Notons de suite, par comparaison de (4) *avec* (2), *que cette inertie électromagnétique, due à la présence d'un champ électrique autour de la sphère, est proportionnelle à l'énergie* W_0 *que représente ce champ électrique et que la sphère emporte avec elle.* Toute variation de la charge ou du rayon, et par suite de l'énergie emmagasinée autour de la sphère au repos, implique une variation proportionnelle de son inertie. Nous examinerons plus loin de manière plus précise la relation qui s'indique ainsi entre l'inertie d'un système et l'énergie potentielle qu'il peut renfermer.

Nous verrons aussi qu'aux vitesses de même ordre que celle de la lumière, le champ électrique n'est plus distribué autour de la sphère en mouvement de la même manière qu'au repos ; il représente une énergie W_e différente de W_0. Si nous continuons à désigner par W_m l'énergie du champ magnétique, le travail nécessaire pour mettre le corps en mouvement en raison de sa charge est :

$$w = W_e + W_m - W_0,$$

et représente bien une énergie cinétique, puisque le corps électrisé a toujours le même aspect pour des observateurs qui lui sont liés.

Le raisonnement très simple qui précède nous a conduit à prévoir au voisinage du repos la masse initiale supplémentaire m_0 en nous plaçant au point de vue de notre troisième définition, celle de la *masse cinétique :* nous avons montré qu'un corps, du fait qu'il est électrisé, possède une capacité supplémentaire pour l'énergie de mouvement. Nous avons utilisé pour cela la localisation bien connue d'énergie dans un champ magnétique.

Le résultat reste exactement le même quand on se place au point de vue de la masse maupertuisienne : le corps électrisé prend, à cause de sa charge, une capacité supplémentaire de quantité de mouvement. Pour le montrer, il est nécessaire de rappeler comment Henri Poincaré, pour maintenir le principe de conservation de la quantité de mouvement, a été conduit à localiser de la quantité de mouvement dans un champ électromagnétique, de la même manière qu'on a dû, pour maintenir la conservation de l'énergie, y admettre la locali-

---

[1] En toute rigueur, cette dernière affirmation fait intervenir le principe de relativité dont on commence ainsi à entrevoir le rôle dans cette théorie.

sation bien connue d'énergie dont nous venons de nous servir. Chemin faisant, nous rencontrerons des résultats généraux qui nous seront utiles par la suite.

6. L'éther et les ondes électromagnétiques. — Il nous faut tout d'abord remonter un peu plus haut que nous n'avons eu besoin de le faire jusqu'ici et rappeler brièvement les propriétés électromagnétiques fondamentales du vide, énoncées par Maxwell et vérifiées expérimentalement par Hertz.

Les deux champs électrique et magnétique h et H dont l'éther peut être le siège et qui correspondent aux localisations d'énergie rappelées plus haut ne sont pas indépendants l'un de l'autre et sont liés de telle façon que chacun d'eux ne peut exister seul qu'à condition de ne pas varier : toute variation dans le temps de l'un des deux champs entraîne la production de l'autre. La variation du champ magnétique dans une région donnée de l'éther produit un champ électrique dont les lignes de force tournent autour de la direction dans laquelle le champ magnétique varie : c'est le phénomène d'induction statique. Si l'espace où ce champ électrique est ainsi créé se trouve occupé par un conducteur, il en résulte dans celui-ci des courants induits qui tournent autour de la direction dans laquelle varie le champ magnétique. La relation quantitative traduisant cette liaison est donnée par la loi bien connue d'induction : *la force électromotrice ou travail du champ électrique le long d'un contour fermé quelconque* C *est égale à la variation par unité de temps du flux d'induction magnétique à travers une surface quelconque* S *s'appuyant sur le contour* C. L'induction magnétique B est égale dans le vide à μ_0H, et si Φ est son flux à travers la surface S, on a :

$$\int_C h \cos\alpha \, dl = -\frac{d\Phi}{dt}. \tag{5}$$

Corrélativement, la variation du champ électrique dans une région donnée de l'éther produit un champ magnétique dont les lignes de force tournent autour de la direction dans laquelle le champ électrique varie. C'est le phénomène primordial du *courant de déplacement* prévu par Maxwell, et dont nous allons voir qu'on peut immédiatement déduire la loi du *courant de convection* vérifiée expérimentalement par Rowland, ainsi que la propagation des ondes électromagnétiques avec la vitesse de la lumière, vérifiée expérimentalement par Hertz.

La relation quantitative traduisant la loi du courant de déplacement est symétrique de la précédente : *la force magnétomotrice ou travail du champ magnétique le long d'un contour fermé quelconque* C *est égale à la variation par unité de temps du flux d'induction électrique à travers une surface quelconque* S *tracée dans le vide et s'appuyant sur le contour* C. L'induction électrique b est égale dans le vide à $K_0 h$, et si φ est son flux à travers la surface S, on a :

$$\int H \cos\beta \, dl = \frac{d\varphi}{dt}. \tag{6}$$

Les deux relations (5) et (6) impliquent, comme conséquence immédiate, qu'une perturbation électromagnétique, produite par exemple par un excitateur de Hertz, se propage sphériquement dans le vide avec la vitesse $\frac{1}{\sqrt{K_0\mu_0}}$. Cette quantité peut être déduite de la comparaison des deux systèmes d'unités électrostatique et électromagnétique C. G. S. et l'expérience la montre numériquement égale à la vitesse de la lumière.

Les autres caractères de la perturbation se montrent particulièrement simples quand on la prend à distance assez grande de sa source pour avoir le droit de l'assimiler à une onde plane se propageant normalement à son plan. Les mêmes équations montrent que la perturbation représentée par cette onde se compose d'un champ électrique h situé dans le plan de l'onde, transversal par conséquent par rapport à la direction de propagation, et d'un champ magnétique H également transversal et perpendiculaire dans le plan de l'onde à la direction du champ électrique. Les trois directions, rangées par ordre alphabétique : champ électrique, champ magnétique, propagation, forment ainsi un trièdre trirectangle dont le sens s'obtient en leur faisant correspondre les trois premiers doigts de la main droite, dans l'ordre indiqué. De plus, les grandeurs des deux champs sont telles qu'ils représentent des énergies égales par unité de volume dans toute onde plane se propageant librement, d'où la relation :

$$(7)\qquad K_0h^2 = \mu_0H^2 \qquad \text{ou} \qquad H = \sqrt{\frac{K_0}{\mu_0}}\,h.$$

Par tous leurs caractères, grandeur de la vitesse de propagation, transversalité des vecteurs représentant l'état du milieu, les ondes électromagnétiques ainsi prévues donnent une excellente représentation des ondes lumineuses : l'analogie est devenue plus frappante encore, après que Hertz eut réussi à produire de telles ondes par voie purement électrique et à en étudier les propriétés. Nous devons considérer aujourd'hui comme un fait établi la nature électromagnétique de la lumière, et admettre pour ses ondes la structure que je viens de rappeler. Première et prodigieuse vérification de la loi du courant de déplacement de Maxwell.

7. Le courant de convection. — Cette même loi conduit à prévoir la production d'un champ magnétique par mouvement d'un corps électrisé. En effet, celui-ci emportant avec lui le champ électrique produit par sa charge, l'intensité de ce champ varie en un point fixe du milieu, pendant que le corps électrisé s'approche, passe, puis s'éloigne. Il y a donc variation avec le temps du champ électrique dans le milieu, et par suite production d'un champ magnétique en vertu de la loi du courant de déplacement. En appliquant l'énoncé de cette loi donné par la formule (6) au cas d'une sphère et en supposant la vitesse assez faible pour que le champ électrique reste distribué autour d'elle pendant le mouvement comme au repos, on retrouve aisément la relation (1) telle que l'expérience permet de la vérifier.

On conçoit aussi que cette expression du champ magnétique produit par la convection cesse d'être exacte quand la vitesse v devient suffisamment grande :

le corps électrisé emportant avec lui son champ magnétique comme son champ électrique, il y a variation, en un point fixe du milieu, de l'intensité du champ magnétique, et par suite production en vertu de la loi d'induction exprimée par (5), d'un champ électrique induit qui s'ajoute au champ électrostatique pour en modifier la distribution. Le calcul montre que cette modification devient appréciable seulement lorsque la vitesse v cesse d'être petite par rapport à la vitesse de la lumière :

$$V = \frac{1}{\sqrt{K_0\mu_0}}. \tag{8}$$

A mesure que la vitesse v augmente, les lignes de force du champ électrique, qui restent radiales à des distances de la sphère suffisamment grandes par rapport à son rayon, cessent d'être distribuées uniformément autour d'elle et tendent à s'accumuler, comme J.-J. Thomson l'a montré le premier, dans le voisinage du plan équatorial perpendiculaire à la direction de la vitesse : ces lignes de force attachées au corps électrisé mobile tendent, aux grandes vitesses, à se placer transversalement par rapport à la direction du mouvement et y arriveraient complètement si v pouvait atteindre la vitesse de la lumière, si l'énergie du champ électromagnétique correspondant à cette configuration limite ne devenait infinie. La vitesse de la lumière représente ainsi une limite supérieure de la vitesse que peut prendre un corps électrisé, limite pour laquelle l'énergie cinétique définie comme :

$$w = W_e + W_m - W_0$$

devient infinie. Cette énergie cinétique augmente donc plus vite que ne l'indique la formule (3) et cesse d'être proportionnelle au carré de la vitesse, quand celle-ci devient du même ordre que la vitesse de la lumière. Nous reviendrons plus loin sur la forme exacte de son expression.

8. La force de Lorentz. — De même qu'un corps électrisé en mouvement produit un champ magnétique et peut agir sur un aimant au voisinage duquel il passe (expérience de Rowland), il est également soumis de la part de celui-ci à une réaction déterminée par l'intensité du champ magnétique produit par l'aimant au point où se trouve le corps électrisé, par la charge et par la vitesse de celui-ci. Autrement dit, un corps électrisé de charge e se mouvant avec la vitesse v dans un champ magnétique extérieur H qui fait l'angle β avec la vitesse, est soumis à une force :

$$f = \mu_0 Hev \sin \beta, \tag{9}$$

dirigée perpendiculairement au plan qui contient H et v, dans le sens indiqué par le médius de la main gauche dont le pouce est placé dans la direction de H et l'index dans celle de v, la charge e étant supposée positive. C'est l'action de cette force qui produit la déviation des particules cathodiques, des rayons α et β des corps radioactifs, dans un champ magnétique extérieur. S'il existe, en même temps qu'un champ magnétique, un champ électrique extérieur h

au point où se trouve le corps électrisé mobile, la force précédente se compose avec la force électrique he dirigée suivant le champ h. Cette dernière existe seule, naturellement, si le champ magnétique est nul ou si le corps électrisé est immobile.

9. Action et réaction. — Les forces qui s'exercent ainsi sur les corps électrisés en mouvement et dont l'expérience vérifie l'existence, qualitativement et quantitativement, ne satisfont pas au principe d'égalité de l'action et de la réaction.

On peut vérifier qu'il en est bien ainsi déjà pour les actions mutuelles de deux corps électrisés en mouvement avec des vitesses assez faibles pour que la formule (1) reste applicable à tous deux. La force électrique mutuelle donnée par la loi de Coulomb satisfait à l'égalité de l'action et de la réaction, mais il n'en est pas de même pour les forces électromagnétiques de Lorentz qui résultent du mouvement de chacun des deux corps dans le champ magnétique produit par l'autre. Il en est de même *a fortiori* pour les grandes vitesses où ni la force électrique, ni la force électromagnétique, ni leur résultante, n'obéissent au principe.

Ce fait devient particulièrement net quand le rayonnement intervient : on s'en convaincra aisément en examinant le phénomène de pression de radiation dont l'existence peut être prévue par application des résultats qui précèdent. Imaginons en effet une source de rayonnement électromagnétique émettant autour d'elle symétriquement par rapport à un axe : excitateur de Hertz ou corps incandescent rayonnant de la lumière. Au moment de l'émission, par raison de symétrie, le rayonnement n'exerce aucune force sur la source. Supposons qu'à distance, dans une certaine direction, la perturbation émise, assimilable à une onde plane, vienne à rencontrer un obstacle, lame métallique ou antenne réceptrice. Le champ électrique présent dans l'onde agissant sur l'obstacle y produit un courant dans sa direction, et le champ magnétique présent dans cette même onde exerce sur ce courant une force dont il est facile de voir qu'elle est dirigée dans le sens de la propagation. On prévoit ainsi la pression de radiation dont l'existence est bien établie expérimentalement. Elle pousse l'obstacle dans la direction où la radiation se propage, et l'action ainsi exercée n'est compensée par aucune réaction exercée sur une portion de matière quelconque. Il y a donc, si l'on tient compte uniquement de la matière, apparition de quantité de mouvement sur l'obstacle au moment où le rayonnement l'atteint : il y a action sans réaction, il n'y a pas conservation de la quantité de mouvement que possède la matière.

On peut voir encore les choses sous un autre aspect si l'on suppose que l'obstacle reçoit et absorbe tout le rayonnement émis par la source, celle-ci n'étant plus supposée symétrique et rayonnant seulement dans la direction de l'obstacle placé à distance. Celui-ci est poussé par la radiation qu'il reçoit, au moment où il la reçoit : contrairement à ce qui se passait dans le cas précédent, la réaction existe, mais elle a devancé l'action d'un temps égal à la durée de propagation entre la source et l'obstacle. La théorie montre en effet que la source a subi, au moment de l'émission, un recul équivalent, comme quantité de mouvement, à l'impulsion exercée sur l'obstacle, mais il n'y a pas à chaque instant égalité de l'action et de la réaction : une quantité de mouvement disparaît de la matière (source) au moment de l'émission et reparaît plus tard sur l'obstacle au moment de l'absorption.

10. La quantité de mouvement électromagnétique. — On pourrait évidemment accepter cette manière de décrire les faits, et abandonner, du moins en ce qui concerne l'électromagnétisme, la conservation de la quantité de mouvement. Mais on peut aussi, comme l'a bien montré Henri Poincaré, sauvegarder les principes, dont la simplicité rend l'emploi si commode, par une généralisation convenable des notions qu'ils impliquent. Il suffit en effet d'admettre que la radiation, la perturbation électromagnétique dans le vide, représente une quantité de mouvement qui se propage avec elle et disparaît quand elle est absorbée.

Dans notre premier cas l'impulsion subie par l'obstacle est compensée par la perturbation qu'il apporte dans le rayonnement et dans la quantité de mouvement, primitivement nulle par raison de symétrie, que ce rayonnement représente. Dans le second cas, au moment de l'émission, le recul de la source est compensé par la quantité de mouvement électromagnétique du rayonnement apparu, et celle-ci se transforme à son tour en impulsion subie par l'obstacle au moment de l'absorption.

Nous pouvons donc retrouver la conservation en considérant le rayonnement comme un véhicule de quantité de mouvement. Aussi bien procède-t-on exactement de même quand on le considère comme un véhicule d'énergie. Il est bien évident, en effet, que nous admettons les localisations d'énergie dans les champs électrique et magnétique, en dehors de la matière, pour maintenir la validité du principe de conservation de l'énergie exactement comme nous cherchons à procéder ici pour la quantité de mouvement. La matière perd de l'énergie au moment où la source émet, elle en reçoit quand l'obstacle absorbe, et il n'y a conservation à chaque instant que si nous admettons le champ électromagnétique comme forme d'énergie à raison de $\frac{K_0 h^2}{8\pi} + \frac{\mu_0 H^2}{8\pi}$ par unité du volume qu'il occupe. Nous sommes conduits tout naturellement avec Poincaré à l'admettre aussi comme forme de quantité de mouvement.

L'énoncé concernant la localisation de la quantité de mouvement est d'ailleurs aussi simple que celui qui concerne la localisation de l'énergie. Dans une région de l'éther siège d'un champ électrique h et d'un champ magnétique H dont les directions font entre elles un angle α, on doit admettre par unité de volume la présence d'une quantité de mouvement :

$$(10) \qquad g = \frac{K_0 \mu_0 H h \sin \alpha}{4\pi} = \frac{S}{4\pi V^2},$$

où S représente la surface du parallélogramme construit sur h et H. Cette quantité de mouvement est dirigée normalement au plan de ce parallélogramme dans le sens indiqué par le médius de la main droite dont le pouce et l'index sont respectivement dirigés suivant h et H. La loi ainsi obtenue est tout à fait générale.

Avant de nous en servir pour calculer la masse maupertuisienne électromagnétique de notre sphère électrisée, il est particulièrement intéressant de l'appliquer au cas d'une onde plane. Etant donnée la description que nous avons faite plus haut d'une telle onde, on voit aisément, d'après l'énoncé précédent, qu'elle représente une quantité de mouvement *dirigée dans le sens de la propagation*, perpendiculaire au plan d'onde qui contient les deux champs électrique et magnétique ; d'autre part, ces champs étant perpendiculaires l'un à l'autre, l'angle α est droit, et si l'on tient compte de la relation (7) qui existe entre leurs grandeurs et de (8), il vient pour la densité g de la quantité de mouvement :

$$g = \frac{K_0 h^2}{4\pi V}. \tag{11}$$

La densité d'énergie a pour valeur, en vertu de (7) :

$$E = \frac{K_0 h^2}{8\pi} + \frac{\mu_0 H^2}{8\pi} = \frac{K_0 h^2}{4\pi}. \tag{12}$$

D'où la relation très simple relative au cas d'une onde plane :

$$g = \frac{E}{V}. \tag{13}$$

La pression de radiation se calcule immédiatement à partir de ce résultat : elle est due à la transmission à l'obstacle de la quantité de mouvement que représente le rayonnement absorbé. Si l'absorption est complète et l'incidence normale, on a, pour la pression de radiation ou quantité de mouvement transmise par unité de surface et par unité de temps, ce que contient le rayonnement sur une longueur égale à sa vitesse de propagation V, c'est-à-dire gV ou E, d'après la relation (13) ; d'où ce résultat que *la pression de radiation sous l'incidence normale est égale à l'énergie du rayonnement par unité de volume.*

Les cas d'incidence oblique ou d'absorption incomplète, avec ou sans réflexion, se traiteraient sans plus de difficultés.

11. La masse électromagnétique. — Puisque nous connaissons la distribution des champs électrique et magnétique autour d'un corps électrisé en mouvement avec la vitesse v, il est facile, par application de la formule (10), de trouver la quantité de mouvement électromagnétique totale localisée dans ce sillage : elle a dû, en vertu du principe de conservation, être fournie par les forces qui ont mis le corps en mouvement et sera restituée au moment de l'arrêt. L'état d'électrisation du corps lui communique ainsi une capacité supplémentaire pour la quantité de mouvement, une masse maupertuisienne d'origine électromagnétique.

Dans le cas d'une sphère dont la vitesse est faible, le champ électrique, nul à l'intérieur si la charge est superficielle, a pour valeur à distance r : $\frac{K_0 r^2}{e}$ pour $r > a$. Comme ce champ est radial et que le champ magnétique donné par (1) est normal au plan méridien passant par la trajectoire du centre et par le point où on considère les champs, la densité g de quantité de mouvement en ce point est située dans le plan méridien et normale au rayon, dans un sens tel que sa projection sur la vitesse est en tout point du champ dans la direction de celle-ci. Cette densité a pour valeur :

$$g = \frac{\mu_0 e^2 v \sin \alpha}{r^4}.$$

On voit facilement que la quantité l e mouvement totale localisée dans le sillage est dirigée suivant la vitesse par raison de symétrie ; on l'obtient en intégrant dans tout le volume extérieur à la sphère le produit de chaque élément de volume par la projection $g \sin \alpha$ de la densité correspondante sur la direction de la vitesse, et on obtient au total :

$$G = \frac{2\mu_0 e^2}{3a} v.$$

On trouve bien ainsi, aux faibles vitesses, une masse maupertuisienne $\frac{G}{v}$ qui se confond avec la masse cinétique déjà obtenue :

$$m_0 = \frac{2\mu_0 e^2}{3a}.$$

12. Cas des grandes vitesses. — Les diverses définitions de la masse ne coïncident plus, pour la partie électromagnétique de l'inertie, lorsque la vitesse cesse d'être petite par rapport à V, et toutes conduisent à des valeurs qui, partant de m_0 pour les faibles vitesses, augmentent avec v et deviennent infinies pour la limite V.

De même que l'énergie cinétique $w = W_e + W_m - W_0$ cesse d'être proportionnelle au carré de la vitesse, la quantité de mouvement totale G cesse d'être proportionnelle à la vitesse et croît plus vite que celle-ci. Nous continuerons à définir une masse maupertuisienne fonction de la vitesse par la relation :

$$m = \frac{G}{v}. \tag{14}$$

Nous verrons dans un instant quelle relation existe entre la masse cinétique m_e et la masse maupertuisienne ou masse proprement dite m.

D'autre part, la définition de la masse comme coefficient d'inertie, par l'équation $f = m\gamma$, ne conduit, tout d'abord, à une masse électromagnétique, fonction seulement de la vitesse, que si l'ensemble, des deux champs entourant le corps électrisé est déterminé à chaque instant et à toute distance par la valeur *actuelle* de la vitesse.

Ceci n'a lieu que si les variations de vitesse sont assez lentes, l'accélération assez petite. On dit alors que le mouvement est quasi-stationnaire. Comme la condition pour qu'il en soit ainsi est que le corps électrisé n'émette pas de rayonnement appréciable en vertu de son accélération (1), ce rayonnement n'emporte à l'infini ni énergie ni quantité de mouvement, et l'on peut appliquer les principes de conservation, en tenant compte uniquement du sillage électromagnétique déterminé par la vitesse; on peut définir des coefficients d'inertie, fonctions seulement de la vitesse, en divisant la force par l'accélération qu'elle produit.

Il est facile de montrer que le résultat obtenu diffère selon que la force agit dans la direction de la vitesse et produit un changement de grandeur de celle-ci (force tangentielle f_l, masse longitudinale m_l) ou dans une direction normale à la vitesse pour produire un changement de direction de celle-ci (force normale f_t, masse transversale m_t). Dans le premier cas, la quantité de mouvement change de grandeur et non de direction, et on a, par définition de l'impulsion :

$$dG = f_l\, dt,$$

d'autre part, la définition de la masse longitudinale comme coefficient d'inertie donne dans ce cas :

$$f_l = m_l \frac{dv}{dt},$$

d'où :

$$m_l = \frac{dG}{dv}, \tag{15}$$

Dans le second cas, la quantité de mouvement change seulement de direction sans changer de grandeur; si $d\alpha$ représente l'angle dont tourne la direction de la vitesse et, par suite, de la quantité de mouvement, pendant le temps dt, on a par définition de l'impulsion :

$$f_t\, dt = G\, d\alpha,$$

et par définition de la masse transversale m_t :

$$f_t = m_t \gamma = m_t v \frac{d\alpha}{dt},$$

d'où :

$$m_t = \frac{G}{v}.$$

La masse transversale se confond ainsi avec la masse maupertuisienne.

Enfin, on obtient, en appliquant la conservation de l'énergie :

$$dw = f dl = m_l v dv = v\, dG,$$

(1) Voir P. Langevin, *Journ. de Phys.*, 4e série, t. V., 1905 et dans le présent volume p. 313.

d'où pour l'énergie cinétique :

$$w = \int_0^v v\,dG,$$

et pour la masse cinétique :

(16) $$m_c = \frac{2w}{v^2} = \frac{2}{v^2}\int_0^v v\,dG.$$

Dans le cas où G cesse d'être proportionnel à v tout en restant fonction de la vitesse, les équations (14), (15) et (16) déterminent les relations entre les diverses définitions de la masse. Mais il est beaucoup plus simple de ne conserver qu'une de ces définitions, puisqu'elles cessent de coïncider.

Pour diverses raisons dont la plus importante est celle de simplicité, nous entendrons d'ordinaire par *masse,* la masse maupertuisienne ou transversale $m = \frac{G}{v}$. C'est d'ailleurs elle qui intervient dans les mesures relatives aux particules électrisées en mouvement (rayons cathodiques et rayons β), lorsqu'on observe les déviations produites par des forces électrique ou électromagnétique perpendiculaires à la direction des rayons.

Nous donnerons le nom de *masse initiale* à la valeur m_0, commune, pour les faibles vitesses, aux diverses définitions de la masse.

La *masse électromagnétique* s'obtiendra comme fonction de la vitesse en divisant par la vitesse la quantité de mouvement localisée dans le sillage électromagnétique du corps électrisé.

La fonction de la vitesse obtenue pour cette quantité de mouvement dépend d'ailleurs de la manière dont on suppose que le corps électrisé se comporte quand sa vitesse varie, suivant qu'on lui suppose une forme fixe ou non.

L'hypothèse la plus simple a semblé être à M. Max Abraham celle de l'indéformabilité : si notre sphère, par exemple, conserve sa forme à toutes les vitesses, on obtient, en désignant par β le rapport $\frac{v}{V}$:

$$m = \frac{G}{v} = \frac{3m_0}{4\beta^2}\left(\frac{1+\beta^2}{2\beta}\log\frac{1+\beta}{1-\beta} - 1\right).$$

Mais, d'autre part, on sait que M. Lorentz, pour rendre compte de l'absence d'action du mouvement de la terre sur les phénomènes électromagnétiques et optiques, a été conduit à admettre que tous les corps ont des formes différentes en mouvement de translation uniforme et au repos, un corps en mouvement par rapport à des observateurs leur paraissant contracté dans la direction de sa vitesse dans le rapport $\sqrt{1-\beta^2}$, de sorte que la sphère en mouvement apparaît comme un ellipsoïde aplati. On obtient, en tenant compte de ce changement de forme dans le calcul de la quantité de mouvement électromagnétique :

(17) $$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Cette formule est beaucoup plus simple que celle de M. Max Abraham, et *les expériences faites sur les rayons β des corps radioactifs montrent que la variation de masse des électrons négatifs avec la vitesse est bien représentée, au degré de précision des mesures, par la formule de M. Lorentz.* Il semble bien certain d'ailleurs, au point de vue du principe de relativité, que toute masse, quelle que soit son origine, doit varier avec la vitesse en suivant cette même loi.

Il est facile, en partant de (17), d'obtenir des lois de variation qui correspondent aux autres définitions de la masse : on obtient immédiatement :

$$G = \frac{m_0 v}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad m_l = \frac{dG}{dv} = \frac{m_0}{(1-\beta^2)^{\frac{3}{2}}}$$

puis :

$$w = \int_0^v v\, dG = m_0 V^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \tag{17'}$$

d'où :

$$m_c = \frac{2m_0}{\beta^2} \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right).$$

13. La pression de Poincaré. — Nous venons de voir que l'expérience confirme l'hypothèse de la contraction de Lorentz pour les particules cathodiques ou électrons libres : leur masse varie avec la vitesse suivant la loi que prévoit cette hypothèse pour l'inertie électromagnétique. L'idée qu'une telle contraction se produise du fait seul qu'un corps est en mouvement a paru tout d'abord singulière. Puis M. Einstein a montré qu'elle correspond seulement à l'un des aspects que présentent les notions nouvelles de l'espace et du temps imposées par le principe de relativité.

A un tout autre point de vue, une remarque importante de Henri Poincaré est venue éclairer le mécanisme même de cette contraction. Nous savons qu'il existe des électrons négatifs libres ou corpuscules cathodiques, tous identiques et portant une charge individuelle égale environ à 4×10^{-10} unités électrostatiques C. G. S. ; nous connaissons aussi leur masse initiale égale à 10^{-27} gramme, très probablement d'origine uniquement électromagnétique, mais nous ignorons tout de leur structure ainsi que de la nature des actions qui en maintiennent l'unité. Il est cependant certain qu'en dehors des actions électromagnétiques, d'autres sont nécessaires à l'intérieur de l'électron pour empêcher la dispersion de sa charge par répulsion mutuelle des éléments qui la composent, en admettant naturellement, et c'est la première chose à tenter, que nous puissions étendre à l'intérieur de l'électron les lois d'électrostatique établies par des expériences faites à notre échelle.

La pression de Poincaré fournit au moins une image simple pour de semblables actions. Imaginons la charge e de l'électron au repos distribuée sur la surface d'une sphère de rayon a.

Les actions électromagnétiques mutuelles entre les divers éléments de cette charge se réduisent, en l'absence de mouvement, à la répulsion électrostatique bien connue qui tend à pousser vers le dehors la couche électrisée avec une force égale par unité de surface à $\frac{2\pi\sigma^2}{K_0}$ où σ représente la densité superficielle $\frac{e}{4\pi a^2}$. Cette répulsion pourra être équilibrée si l'électron est soumis à une pression venant de l'éther extérieur et ayant pour valeur :

$$(18) \qquad p = \frac{2\pi\sigma^2}{K_0} = \frac{e^2}{8\pi K_0 a^4}.$$

Si l'on imagine qu'une telle pression règne dans tout l'espace occupé par l'éther extérieur aux électrons, chacun de ceux-ci sera en équilibre, au repos, s'il prend la forme sphérique avec un rayon a déterminé par la relation précédente en fonction de sa charge et de la pression universelle p. Je n'insiste pas sur les difficultés que pourrait soulever la question de stabilité de cet équilibre.

Le fait remarquable signalé par Henri Poincaré est que, si l'on suppose l'électron en mouvement et les divers éléments de sa couche superficielle électrisée soumis à *cette même pression* extérieure uniforme ainsi qu'aux forces électrostatique et électromagnétique de Lorentz sous l'action des autres éléments, *la forme d'équilibre change et devient précisément l'ellipsoïde aplati de Lorentz.* On conçoit d'ailleurs aisément qu'il puisse en être ainsi : nous avons vu en effet que le champ électrique n'est pas distribué en mouvement comme au repos, et qu'il s'affaiblit aux pôles pour augmenter à l'équateur. La pression électrostatique diminue donc aux pôles et la pression de Poincaré venant de l'extérieur l'emporte : l'électron s'aplatit aux pôles jusqu'à ce qu'on retrouve un nouvel équilibre ; il ne se dilate pas à l'équateur, parce que la force électromagnétique de Lorentz y agit en sens opposé à la pression électrostatique accrue, et fait que l'équilibre existe pour le même rayon équatorial a qu'au repos avec un demi-axe polaire égal à :

$$a\sqrt{1-\beta^2}.$$

Nous obtenons ainsi pour l'électron une image provisoire, mais simple, qui implique la contraction de Lorentz et s'accorde avec la variation expérimentale de l'inertie de l'électron en fonction de sa vitesse. Nous sommes donc justifiés à envisager la pression p comme un des facteurs essentiels dans l'équilibre de l'électron.

Nous pouvons encore envisager les choses de la manière suivante : la configuration d'équilibre de l'électron au repos est celle qui rend minimum l'énergie potentielle totale des actions qui s'y superposent, répulsions électrostatiques et pression de Poincaré. Quand la forme est sphérique et de rayon a, l'énergie potentielle des premières est $\frac{e^2}{2K_0 a}$, celle de la pression extérieure est égale au produit de cette pression par le volume de l'électron $\frac{4}{3}\pi a^3$ d'où pour l'énergie potentielle totale au repos :

$$E_0 = \frac{e^2}{2K_0 a} + \frac{4}{3}\pi a^3 p.$$

La valeur de a qui rend cette expression minimum est donnée précisément par la relation (18). Si maintenant nous remplaçons dans E_0 la pression p en fonction du rayon d'équilibre, nous obtenons, pour l'énergie potentielle totale de l'électron en équilibre au repos :

$$E_0 = \frac{e^2}{2K_0 a} + \frac{e^2}{6K_0 a} = \frac{2e^2}{3K_0 a}. \tag{19}$$

14. Masse et énergie. — La comparaison de cette expression avec celle de la masse électromagnétique initiale m_0 donnée par (4) nous conduit immédiatement à la relation remarquable :

$$m_0 = K_0 \mu_0 E_0 = \frac{E_0}{V^2}. \tag{20}$$

La masse initiale électromagnétique d'un électron est égale au quotient de son énergie potentielle totale par le carré de la vitesse de la lumière.

Nous retrouverions cette même relation si, au lieu d'un électron sphérique, nous considérions un système en équilibre sous l'action superposée des forces électromagnétiques et d'actions telles que la configuration d'équilibre se modifie suivant la contraction de Lorentz quand le système est mis en mouvement.

Par une des plus belles et des plus importantes applications du principe de relativité, M. Einstein a pu généraliser la relation précédente et l'étendre à d'autres cas que ceux d'équilibre électrostatique envisagés jusqu'ici. J'ai développé moi-même, indépendamment de lui, dès 1906, les considérations qui suivent, et les ai exposées dans mon enseignement au Collège de France, sous une forme moins élémentaire et plus générale qu'ici.

Nous allons montrer que la présence de rayonnement électromagnétique à l'intérieur d'une cavité vide de matière correspond pour l'enveloppe à une inertie supplémentaire déterminée par l'énergie du rayonnement, et d'autre part que l'émission ou l'absorption de rayonnement par un système matériel se traduit par une variation de son inertie, de sa capacité de quantité de mouvement, proportionnelle à l'énergie du rayonnement.

15. Le principe de relativité. — Toutes les expériences tentées pour mettre en évidence le mouvement d'observateurs terrestres par rapport au milieu qui transmet les actions électromagnétiques n'ont donné que des résultats négatifs malgré l'extrême précision qu'il a été possible d'atteindre ; et cependant nous savons que, pour deux positions de la terre diamétralement opposées sur l'orbite, en janvier et juillet par exemple, la vitesse a changé d'environ 60 kilomètres par seconde. Ce résultat négatif permet donc d'affirmer que les phénomènes électromagnétiques, rapportés à des axes liés à la Terre, se présentent sous le même aspect en toute saison, que les lois fondamentales rappelées plus haut sont exactes à la fois par rapport à deux systèmes d'axes qui se meuvent l'un par rapport à l'autre à raison de 60 kilomètres à la seconde. Autrement dit, tout se passe de la même façon pour divers groupes d'observateurs en mouvement de translation uniforme les uns par rapport aux autres, tout se passe *pour chacun d'eux* comme s'il était immobile par rapport à l'éther.

En particulier, il est exact à la fois pour eux tous, comme conséquence des lois fondamentales, qu'une perturbation électromagnétique ou lumineuse se propage dans toutes les directions avec une même vitesse :

$$V = \frac{1}{\sqrt{K_0 \mu_0}}.$$

De ce seul fait découlent des conséquences, à première vue bien singulières, quant aux conceptions de l'espace et du temps, conséquences incompatibles avec l'espace et le temps qu'exige et qu'implique la mécanique rationnelle. Tout d'abord, la contraction de Lorentz sous la forme suivante : un même objet mesuré par deux groupes d'observateurs qui se meuvent uniformément l'un par rapport à l'autre avec une vitesse $v = \beta V$ est, dans la direction du mouvement, plus court dans le rapport $\sqrt{1 - \beta^2}$ pour les observateurs qui le voient passer qu'à ceux qui lui sont liés. Des conséquences analogues existent pour l'intervalle de temps entre deux événements : simultanés par exemple pour certains observateurs, les mêmes événements cessent de l'être pour d'autres observateurs en mouvement par rapport aux premiers.

Quelque singulières que soient ces conséquences, dont nous n'aurons pas d'ailleurs à nous servir ici, elles sont imposées par les faits, elles sont impliquées dans la structure même des équations fondamentales de l'électromagnétisme : ces équations ne peuvent avoir la même forme à la fois pour divers groupes d'observateurs en mouvement les uns par rapport aux autres que si les mesures d'espace et de temps faites par eux ont entre elles les relations que je viens de rappeler. Autrement dit, ces équations possèdent un groupe de transformation, découvert par Lorentz, dont la partie relative à l'espace et au temps est profondément différente de celle qui correspond au groupe de transformation des équations de la mécanique ordinaire : il y a incompatibilité entre les deux groupes, et tout nous fait penser que celui de l'électromagnétisme est le seul exact, c'est-à-dire que l'expérience peut nous donner seulement l'espace et le temps du groupe de Lorentz.

Nous utiliserons le principe de relativité sous une forme très simple, et nous aurons besoin de conserver, dans les équations de transformation qui relient les mesures d'une même grandeur faites par deux groupes d'observateurs en mouvement uniforme l'un par rapport à l'autre, seulement les termes qui sont du premier ordre en fonction de leur vitesse relative.

Imaginons une onde électromagnétique plane étudiée simultanément par deux observateurs O_0 et O_1 dont la vitesse relative $v = \beta V$ sera supposée normale au plan de l'onde, et supposons à cette vitesse un sens tel que O_0 voie O_1 se mouvoir en sens inverse de la propagation, courir au-devant de l'onde ; réciproquement O_1 verra O_0 se mouvoir avec la même vitesse v dans le sens de la propagation, fuir devant l'onde qui l'atteindra d'ailleurs à un moment donné, puisque v est toujours supposé inférieur à V, β toujours inférieur à 1. En vertu du principe de relativité, tous les résultats que nous avons obtenus sont exacts à la fois pour O_0 et pour O_1 ; en particulier pour tous deux l'onde se propage avec une même vitesse V, mais cette même onde n'aura pas la même intensité pour tous deux : elle sera plus intense, elle contiendra des champs électrique et magnétique plus grands pour O_1 que pour O_0, pour celui qui vient au-devant de l'onde que pour celui qui fuit devant elle.

Nous pourrions déduire ce résultat du groupe de transformation de Lorentz qui donne la correspondance entre les mesures d'une même grandeur, le champ électrique de l'onde par exemple, faites simultanément par les deux observateurs. Mais nous pouvons, en nous contentant des termes du premier ordre qui suffiront pour notre objet, trouver cette relation de la manière suivante :

Par définition, le champ électrique de l'onde est mesuré, pour l'observateur O_1, par la force qui s'exerce dans l'onde sur une charge électrique unité *immobile par rapport à lui.*

Soit h_1 cette force. Pour l'observateur O_0, la charge électrique considérée est en mouvement dans le sens opposé à la propagation, normalement à l'onde avec la vitesse v. Elle est donc soumise, pour lui, non seulement à la force électrique, mais encore à la force électromagnétique de Lorentz résultant de son mouvement en présence du champ magnétique de l'onde. Comme ce champ magnétique est perpendiculaire au champ électrique, l'application de la loi que traduit la formule (9) montre que cette force électromagnétique a même direction et même sens que la force électrique. Si h_0 et H_0 sont les deux champs présents dans l'onde pour l'observateur O_0, la force qui s'exerce sur la charge unité considérée a pour valeur :

$$h_0 + \mu_0 H_0 v.$$

Mais, puisqu'il s'agit d'une onde plane, on a entre les deux champs la relation (7), d'où résulte, en tenant compte de (8), la valeur $h_0\ (1 + \beta)$ mesurée par l'observateur O_0. Comme il résulte d'ailleurs du principe de relativité que les mesures d'une *même* force, faites par deux observateurs en mouvement l'un par rapport à l'autre, ne diffèrent qu'au second ordre en fonction de leur vitesse relative, on peut écrire à ce même degré d'approximation :

$$h_1 = h_0\,(1 + \beta). \tag{21}$$

Pour une onde se propageant dans le sens opposé par rapport aux mêmes observateurs, on aurait au contraire :

$$h_1 = h_0\,(1 - \beta). \tag{22}$$

L'onde reste ainsi toujours moins intense pour celui des deux observateurs qui semble à l'autre fuir devant elle.

Les densités d'énergie et de quantité de mouvement dans l'onde, données par les relations (11) et (12), exactes à la fois pour les deux observateurs, ne seront pas les mêmes pour eux deux et seront entre elles dans le rapport $(1 + \beta)^2$ ou $(1 - \beta)^2$, suivant le sens dans lequel se propagera l'onde.

16. L'inertie du rayonnement. — Considérons maintenant un récipient de

forme particulièrement simple constitué par deux lames planes parallèles, parfaitement réfléchissantes sur leurs faces en regard, et situées à distance d l'une de l'autre. Supposons enfermé entre elles un rayonnement électromagnétique de composition spectrale quelconque se propageant par ondes planes parallèles aux lames. Ces ondes vont se réfléchir alternativement sur les deux lames et constitueront un rayonnement emprisonné à l'intérieur du récipient. Soit W_0 l'énergie électromagnétique qu'il représente, par unité de surface des lames, pour l'observateur O_0 que nous supposerons immobile par rapport au récipient. Chaque réflexion sur les lames immobiles changeant simplement le sens de propagation d'une onde sans en changer l'énergie, il est évident qu'en moyenne, pour l'observateur O_0, la moitié de cette énergie existe dans le récipient sous forme d'ondes se propageant dans un sens et l'autre moitié sous forme d'ondes se propageant en sens opposé.

En vertu de la relation (13), la première moitié représente une quantité de mouvement :

$$G_0 = \frac{W_0}{2V},$$

dirigée dans le sens où elle se propage, et la seconde moitié une quantité de mouvement égale et de sens opposé. Pour l'observateur O_0 le rayonnement représente donc en moyenne une quantité de mouvement nulle.

La réflexion sur les lames s'accompagne d'ailleurs d'une pression de radiation qui résulte du changement de sens de la quantité de mouvement électromagnétique des ondes au moment où elles se réfléchissent. Cette pression est égale en moyenne à la densité d'énergie du rayonnement $\frac{W_0}{d}$. Pour maintenir les lames en équilibre, il est donc nécessaire d'exercer sur elles du dehors une pression égale à celle que la radiation exerce au dedans. Cette pression extérieure, nécessaire pour l'équilibre, représente par unité de surface des lames une énergie potentielle égale à pd, c'est-à-dire à W_0, de sorte que l'énergie totale E_0 disponible dans le système au repos a pour valeur $2W_0$. C'est bien là, en particulier, l'énergie du rayonnement qui sortirait du récipient si les lames un peu transparentes laissaient lentement échapper au dehors le rayonnement compris entre elles et si une pression extérieure constante agissant sur elles les rapprochait à mesure que le rayonnement s'en va. On voit facilement que, dans ces conditions, le travail pd fourni par la pression extérieure se transforme en énergie de rayonnement pendant les réflexions qui se font maintenant sur des lames lentement mobiles et qu'au moment où celles-ci se rejoignent, l'énergie rayonnée au dehors est $2W_0$, double de l'énergie électromagnétique primitive.

La pression extérieure joue ici un rôle analogue à celui de la pression de Poincaré dans le cas de l'électron ; elle doit intervenir de la même manière dans le calcul de l'énergie totale disponible dans le système, supposé maintenu à pression extérieure constante.

Aussi bien c'est seulement si cette condition de pression extérieure constante est remplie pendant la mise en mouvement qu'on pourra considérer le système comme étant resté le *même* en mouvement qu'il était au repos, et qu'il aura conservé le *même* aspect pour des observateurs mis en mouvement en même temps que lui, liés à lui [1].

Nous allons voir maintenant que l'observateur O_1 qui voit passer le récipient avec la vitesse v, lui attribuera une quantité de mouvement d'origine électromagnétique localisée dans le rayonnement compris entre les lames. Pour cet observateur, en effet, les ondes se propageant dans le sens du mouvement qu'a le récipient par rapport à lui, représentent pour lui une quantité de mouvement dans ce sens plus grande que G_0 dans le rapport $(1 + \beta)^2$:

$$G_1 = G_0 (1 + \beta)^2,$$

et les ondes qui se propagent en sens inverse représentent pour lui :

$$G_1' = G_0 (1 - \beta)^2.$$

D'où, au total, pour le rayonnement, une quantité de mouvement *dirigée dans le sens où se meut le récipient,* et ayant pour valeur :

$$G = G_1 - G_1' = 4\, G_0 \beta = \frac{2W_0}{V^2} v = \frac{E_0}{V^2} v,$$

La présence du rayonnement d'énergie E_0 correspond donc à une capacité de quantité de mouvement, à une masse électromagnétique égale encore au quotient $\frac{E_0}{V^2}$.

17. Variation de masse par absorption ou émission du rayonnement. — Nous examinerons maintenant un dernier cas : celui d'un corps qui émet à l'extérieur un rayonnement représentant une diminution ΔE_0 de l'énergie interne du corps mesurée par des observateurs qui lui sont liés ; nous allons voir qu'il en résulte pour sa masse initiale m_0 une diminution égale à $\frac{\Delta E_0}{V^2}$. Inversement l'accroissement d'énergie interne par absorption de rayonnement s'accompagne d'un accroissement analogue de la masse initiale.

Considérons comme source une lame plane qui rayonne par ses deux faces des ondes planes se propageant de part et d'autre normalement à son plan, et supposons ce rayonnement symétrique pour un observateur O_0 lié à la source. Celle-ci envoie de part et d'autre des quantités de mouvement électromagnétique égales et opposées et par application de la conservation, elle reste immobile pour O_0 pendant toute la durée de l'émission, une seconde, par exemple. Si ΔE_0 est l'énergie totale rayonnée pendant ce temps par unité de surface de la source, les trains d'onde qui se propagent à droite et à gauche représentent chacun pour O_0 l'énergie $\frac{\Delta E_0}{2}$.

Quel aspect prendra le phénomène pour l'observateur O_1? Il voit la source se mouvoir vers sa droite, par exemple, avec la vitesse v. Les ondes émises à

---

[1] Ceci résulte du fait que la pression est un invariant de la transformation de Lorentz.

droite, qui ont pour O_0 la densité d'énergie $\frac{\Delta E_0}{2V}$, puisqu'elles occupent pour lui la longueur V, auront pour O_1 la densité $\frac{\Delta E_0}{2V}$ $(1+\beta)^2$; elles n'occuperont d'ailleurs pour lui qu'une longueur $V - v$, puisque la tête des ondes émises vers la droite au début de l'unité de temps se trouve à la fin à une distance de son point de départ égale à la vitesse V de propagation et que la queue de ce même train d'ondes se trouve sur la lame qui a parcouru dans le même sens la distance v. Le train d'ondes de droite représente donc pour O_1 une énergie :

$$\frac{\Delta E_0}{2V}(1+\beta)^2(V-v) = \frac{\Delta E_0}{2}(1+\beta)$$

en négligeant les termes en β^2.

Ce train représente donc pour O_1 une quantité de mouvement émise vers la droite par la source :

$$\Delta G_1 = \frac{\Delta E_0}{2V}(1+\beta).$$

On verrait de même que le train d'ondes de gauche, de longueur $V + v$ pour O_1, représente pour lui une quantité de mouvement émise vers la gauche :

$$\Delta G_1' = \frac{\Delta E_0}{2V}(1-\beta).$$

Au total la source, pour O_1, a émis vers la droite, c'est-à-dire dans le sens de son mouvement, une quantité de mouvement :

$$\Delta G = \Delta G_1 - \Delta G_1' = \frac{\Delta E_0}{V}\beta = \frac{\Delta E_0}{V^2}v.$$

En vertu du principe de conservation, la source a dû perdre cette même quantité de mouvement : or sa vitesse par rapport à O_1 n'a pas changé, puisqu'elle est restée immobile par rapport à O_0. Donc le quotient de sa quantité de mouvement par sa vitesse, sa masse par conséquent, a diminué de :

$$\Delta m_0 = \frac{\Delta G}{v} = \frac{\Delta E_0}{V^2}. \tag{25}$$

Nous arrivons ainsi à ce résultat d'importance capitale :

Toute variation d'énergie interne d'un système matériel par émission ou absorption de rayonnement est accompagnée d'une variation proportionnelle de son inertie.

18. Variation de la masse avec la température. — Examinons d'abord quelques conséquences de ce dernier énoncé, quelques circonstances dans lesquelles un changement d'état d'un système matériel isolé s'accompagne de variation dans l'énergie interne par émission ou absorption de rayonnement.

Une même portion de matière, prise à deux températures différentes, peut passer de l'une à l'autre par émission ou absorption de chaleur rayonnante.

Nous pouvons évaluer la variation de masse qui en résulte en divisant par V^2 la quantité de chaleur échangée avec l'extérieur. Prenant comme exemple l'eau, dont la capacité calorifique est particulièrement grande, nous voyons qu'une masse d'eau ayant à 0° une inertie égale à 1 g, aura à 100° une inertie plus grande, et la différence s'obtiendra en divisant la chaleur absorbée, 100 calories grammes équivalentes à $4{,}18 \times 10^9$ ergs, par V^2 ou 9×10^{20}, cela donne 5×10^{-12} environ, c'est-à-dire une variation tout à fait insensible.

Cet exemple montre bien, malgré la petitesse de l'effet prévu, comment la notion de masse cesse de se confondre, au point de vue théorique, avec celle de quantité de matière. Deux masses égales d'eau, d'égale inertie, prises l'une à 100° et l'autre à 0°, ne contiennent pas la même quantité de matière, puisqu'elles cessent d'être égales quand on les ramène toutes deux à la même température. Deux masses d'eau contenant le même nombre de molécules n'ont la même inertie que si elles sont prises à la même température, que si leurs énergies internes sont égales.

Nous allons examiner maintenant des changements d'état plus profonds qui correspondent à des variations plus importantes d'énergie interne et par conséquent d'inertie.

19. Cas des réactions chimiques. — Imaginons qu'une réaction chimique soit produite à l'intérieur d'un récipient fermé, d'un tube de verre scellé, par exemple. La chaleur dégagée par la réaction se dissipera par rayonnement à travers l'enveloppe, et il en devra résulter, d'après ce qui précède, une diminution d'inertie facile à calculer par la formule (23) et proportionnelle à l'énergie rayonnée. L'ordre de grandeur des chaleurs de réaction est tel que les variations de masse ainsi prévues sont encore extrêmement petites et inaccessibles aux mesures.

Prenons en effet une des réactions les plus exothermiques par unité de masse réagissante : celle de formation de l'eau liquide à partir de ses éléments pris à l'état gazeux. La formation de 18 g d'eau dégage 69 000 calories grammes, équivalentes à environ 3×10^{12} ergs. Comme V^2 est égal dans le même système d'unités à 9×10^{20}, la théorie prévoit une diminution de masse égale à $\frac{1}{3} \times 10^{-8}$ g, soit une différence relative de un cinq milliardième entre la masse du gaz tonnant et celle de l'eau qu'il peut former, prise à la même température. Nous ne pouvons non plus espérer mettre en évidence une variation d'inertie de cet ordre.

20. Cas des transformations radioactives. — Les corps radioactifs sont le siège de phénomènes spontanés qui mettent en jeu des énergies énormes par rapport à celles que dégagent les réactions chimiques ordinaires. On sait par exemple que 1 g de radium métallique dégage 130 calories par heure, en même temps qu'il se transforme en radium D à travers les formes successives émanation et radium A, B et C, et qu'il émet de l'hélium sous forme de particules α La quantité de radium qui se transforme en une heure dans 1 g de ce méta est d'ailleurs extraordinairement petite, étant donnée la lenteur de la destruction spontanée du radium : la vie moyenne d'un atome de radium est en effet

d'environ 2.600 ans, de sorte qu'en une heure il se détruit dans 1 g une masse représentée par $\frac{1}{2.600 \times 365 \times 24}$, et la transformation complète de 1 g de radium en hélium et radium D donnerait en ergs une énergie :

$$130 \times 2{,}600 \times 365 \times 24 \times 4{,}18 \times 10^7 = 1{,}1 \times 10^{17}.$$

Et ceci ne représente qu'une étape des transformations qui partent de l'uranium pour aboutir au plomb. Nous devons donc conclure que les produits ultimes (hélium et plomb) de l'évolution d'une quantité donnée d'uranium ont une inertie globale inférieure de plus d'un dix-millième à celle de l'uranium primitif, puisqu'on a pour la seule étape radium-radium D une diminution de masse égale par gramme à :

$$\Delta m_0 = \frac{1{,}1 \times 10^7}{9 \times 10^{20}} = 1{,}2 \times 10^{-4}.$$

Comment mettre en évidence une telle variation d'inertie? Supposons que la perte d'énergie par rayonnement, d'où résulte la variation de masse, ne s'accompagne d'aucune variation de poids, que l'énergie interne, dont nous savons qu'elle contribue à l'inertie n'apporte aucune contribution au poids. Il en résulterait qu'une certaine quantité d'uranium, et les produits, hélium et plomb, de sa transformation, auraient des poids égaux, mais des inerties différentes : ils ne prendraient par conséquent pas la même accélération sous l'action de la pesanteur. Il devrait exister en un même lieu pour différentes substances, uranium, hélium, plomb, etc., des différences au moins égales au dix-millième dans les valeurs correspondantes de l'accélération de la pesanteur g, différences tout à fait accessibles aux mesures.

Or, l'expérience montre que de telles différences n'existent pas, que la loi de la constance de g pour tous les corps en un même lieu se vérifie d'une manière extrêmement précise : il y a, en un lieu donné, proportionnalité exacte du poids à l'inertie.

La meilleure vérification de cette loi a été faite par M. Eotvös au moyen de la balance de torsion : son procédé revient en somme à vérifier que la direction de la verticale est exactement la même pour tous les corps. Cette direction est celle de la résultante du poids réel et de la force centrifuge due à la rotation de la Terre : cette dernière force étant proportionnelle à l'inertie, la résultante, c'est-à-dire la verticale observée, n'aurait pas exactement la même direction pour tous les corps, s'il n'y avait pour tous un rapport constant entre le poids et l'inertie. M. Eotvös affirme que cette constance est exacte au vingt-millionième au moins. Nous sommes loin d'écarts supérieurs au dix-millième.

Il nous faut conclure de là que, si l'énergie est inerte, elle est en même temps pesante en proportion, qu'une variation d'énergie interne s'accompagne en même temps d'une variation de masse et d'une variation de poids, que le même corps, par exemple, pèse un peu plus lourd à chaud qu'à froid, que l'eau pèse un peu moins que le mélange tonnant dont elle est issue, que l'uranium pèse notablement plus que les produits matériels de sa destruction spontanée

Cette pesanteur de l'énergie interne, qui nous empêche de mettre en évidence les variations de l'inertie par les variations de g, peut, à un autre point de vue, rendre plus facile la vérification expérimentale des conséquences de la théorie, en permettant de remplacer l'observation d'une variation d'inertie par celle, beaucoup plus facile, d'une variation de poids connexe de toute variation d'énergie interne ΔE_0 et mesurée en grammes, comme la variation de masse, par $\frac{\Delta E_0}{V^2}$.

Elle est en plein accord avec le résultat négatif des expériences tentées par Landolt et par d'autres pour voir si une réaction chimique effectuée dans un récipient clos s'accompagne d'une variation de poids. Nous en prévoyons effectivement une, mais très inférieure à ce que pourraient déceler les balances les plus sensibles, puisqu'elle n'atteindrait pas, pour les réactions les plus énergiques, le dix-milliardième du poids primitif.

Restent les transformations radioactives. Nous pourrions évidemment enfermer dans un tube scellé du radium ou de l'uranium et attendre, pour constater une variation de poids, que la transformation spontanée soit sinon terminée, du moins notablement avancée : cela demanderait des centaines d'années pour le radium et des millions de siècles pour l'uranium. Fort heureusement, une si longue attente n'est nullement nécessaire, et il suffirait, pour vérifier l'exactitude de nos prévisions, de mesurer des poids atomiques avec une précision supérieure au dix-millième et nullement impossible à atteindre.

Si, en effet, la masse et par conséquent le poids d'une même portion de matière se c nservait exactement au cours des transformations radioactives dont elle peut être le siège, il en résulterait des relations simples entre les poids atomiques des éléments successivement engendrés. Pour une transformation accompagnée seulement d'émission de rayons β et γ le poids atomique ne devrait pas changer, puisque le nouvel atome, pour devenir électriquement neutre, doit récupérer le ou les électrons négatifs, de masse toujours la même, qui ont été perdus par l'atome transformé. Dans le cas d'émission d'une particule α ou d'un atome d'hélium, le poids atomique diminuerait exactement du poids atomique de l'hélium. Les différences entre les poids atomiques de l'uranium ou du radium, et celui du plomb résultant de leur transformation devraient être exactement des multiples entiers simples du poids atomique de l'hélium. Si, au contraire, nos conclusions sont exactes, ces différences devront être plus grandes, de quantités proportionnelles aux énergies perdues pendant les transformations intermédiaires.

Étant donné l'ordre de grandeur de ces poids atomiques, supérieurs à 200, et celui de la chaleur dégagée pendant les transformations, les écarts porteraient sur la deuxième décimale. On voit la grande importance théorique qu'auraient des mesures faites à ce degré de précision.

21. La loi de Prout. — Mais est-il nécessaire d'attendre, pour conclure, qu'on y soit parvenu? Il me semble bien que *la preuve expérimentale de l'inertie de la pesanteur de l'énergie interne est apportée par l'existence aujourd'hui certaine des écarts à la loi de Prout,* par le fait que les poids atomiques, bien que sensiblement multiples entiers simples d'une même quantité, présentent cependant

de petites irrégularités à partir de cette loi. Il est très remarquable que les poids atomiques de la plupart des éléments, calculés en prenant celui de l'hydrogène comme unité, sont groupés autour de nombres entiers sans cependant se confondre avec eux :

C = 11,91,	Az = 13,90,	O = 15,87,	F = 18,90,
He = 4,	Li = 6,94,	Gl = 9,	Bo = 10,90,
Na = 22,80,	Mg = 24,12,	Al = 26,90,	Si = 28,10, etc.

Ce fait n'est certainement pas dû au hasard et pose une importante question de philosophie naturelle, celle de l'unité de la matière à laquelle nous voyons maintenant la possibilité de répondre.

Aussi longtemps qu'a été admis sans discussion le principe de conservation de la masse matérielle, il a semblé impossible de concilier l'existence des écarts certains à la loi de Prout avec l'hypothèse séduisante que les divers atomes sont construits à partir d'un ou de quelques éléments primordiaux. La découverte des transformations radioactives est venue apporter un argument décisif en faveur de cette hypothèse, mais les écarts subsistent, et il faut en comprendre la raison.

L'explication que je propose résulte immédiatement de tout ce qui précède : *les écarts proviendraient de ce que la formation des atomes à partir d'éléments primordiaux* (par désintégration, comme nous le voyons en radioactivité, ou par un processus inverse non encore observé qui donnerait naissance aux atomes lourds), *s'accompagnerait de variations d'énergie interne par émission ou absorption de rayonnement*. La somme des poids des atomes formés différerait de celle des atomes transformés d'une quantité égale au quotient de la variation d'énergie par le carré de la vitesse de la lumière. Et les écarts sont tels que les énergies ainsi mises en jeu seraient tout à fait du même ordre que celles observées effectivement au cours des transformations radioactives.

Si par exemple l'atome d'oxygène résultait de la condensation de 16 atomes d'hydrogène ou de 4 atomes d'hélium, il suffirait, pour expliquer le poids atomique 15,87 *inférieur* à 16, d'admettre que cette condensation s'est accompagnée d'une *perte* d'énergie cinq fois plus grande seulement que celle dégagée pendant la transformation d'un atome de radium en radium D.

Loin de constituer une énigme, ces écarts où nous verrions la preuve expérimentale de l'inertie et de la pesanteur de l'énergie, nous apporteraient au contraire des renseignements précieux sur la filiation possible des éléments et sur la grandeur des énergies mises en jeu pendant leurs transformations.

22. La matière, réservoir d'énergie. — Nous avons vu que toute variation d'énergie interne d'un corps par rayonnement s'accompagne d'une variation proportionnelle de sa masse et de son poids et, d'autre part, que la présence d'énergie accumulée, sous forme de rayonnement dans une enceinte fermée ou sous forme électrostatique, correspond à l'existence d'une masse et par conséquent d'un poids, reliés toujours de la même manière à l'énergie présente.

Doit-on considérer que toute l'inertie de la matière n'a pas d'autre origine? Le principe de relativité a conduit à penser que la variation de masse avec la vitesse $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$, établie tout d'abord pour l'inertie électromagnétique, s'appliquait de manière générale. Il en est probablement de même pour la relation $m_0 = \frac{E_0}{V^2}$. A toute inertie correspondrait la présence dans le système qui la possède d'une énergie égale au produit de la masse par le carré de la vitesse de la lumière, énergie dont la mise en liberté devrait correspondre à la destruction complète de la structure matérielle.

Sans préjuger si nous pourrons un jour acquérir cette puissance destructrice et épuiser les réserves d'énergie présentes dans la matière, nous pouvons, dans l'hypothèse qui précède, évaluer l'importance et l'énormité de ces réserves. Chaque gramme de matière, quelle que soit sa nature, correspondrait à la présence d'une énergie interne égale à 9×10^{20} ergs, c'est-à-dire équivalente à la chaleur que fournirait la combustion de 3×10^9 grammes ou 3 millions de kilogrammes de houille.

Ce résultat, que la matière est inerte et pesante en proportion de l'énergie qu'elle contient, fait que le principe de la conservation de la masse se confond avec celui de l'énergie. Dans un système fermé, qui n'échange pas d'énergie avec l'extérieur, la masse totale se conserve, mais les masses individuelles des diverses portions du système varient dans la mesure des échanges d'énergie qui se produisent entre elles.

La nouvelle dynamique reposerait sur les deux lois fondamentales de conservation de l'énergie et de conservation de l'impulsion ou quantité de mouvement. Ces deux lois ne sont d'ailleurs pas indépendantes : au point de vue du principe de relativité, elles apparaissent comme deux aspects différents d'une loi unique, la conservation de l'impulsion d'Univers.

L'individualité d'une portion de matière ne pourrait plus être caractérisée comme autrefois par sa masse : il la faut chercher maintenant dans le nombre et la structure des éléments, atomes ou molécules, dont elle est formée. Les transmutations auxquelles nous font assister les corps radioactifs permettront peut-être de reculer cette structure au delà de celle des atomes changeants où la chimie s'arrête et de trouver l'individualité d'une portion de matière dans le nombre et la nature des éléments primordiaux à partir desquels les atomes sont construits, corpuscules cathodiques et peut-être noyaux positifs des atomes d'hélium ou d'hydrogène. Seuls le nombre et la nature de ces éléments resteraient invariables à travers tous les changements que subiraient la matière et pourraient servir à définir celle-ci.

23. Cas du rayonnement libre. — Nous avons été conduits à attribuer à un rayonnement se propageant librement avec la vitesse de la lumière V, non seulement une énergie E_0 distribuée avec la densité donnée par (12), mais encore une quantité de mouvement de densité donnée par (13) et représentée par :

$$G = \frac{E_0}{V},$$

dans la direction de propagation. Nous pouvons aussi lui attribuer une masse, définie toujours par le quotient de la quantité de mouvement par la vitesse, égale ici à V. Cette masse sera donc $\frac{E_0}{V^2}$, toujours reliée à l'énergie par la même relation que dans le cas de la matière. Seulement, alors que la matière, contenant ou non du rayonnement enfermé, peut prendre une vitesse variable en valeur absolue depuis 0 jusqu'à V, l'énergie représentée par le rayonnement libre ne peut se déplacer qu'avec la vitesse V.

24. La pesanteur de la lumière. — L'énergie contenue dans la matière est pesante en même temps qu'inerte ; doit-on considérer qu'il en est de même pour l'énergie rayonnante se propageant librement; doit-on considérer que les ondes lumineuses ou électromagnétiques sont sensibles à l'action d'un champ de gravitation, comme le serait une masse équivalente au sein de la matière? Il est bien vraisemblable que nous devons répondre par l'affirmative, que les rayons lumineux sont déviés au voisinage de la matière en vertu de la gravitation, et que la loi d'attraction universelle de Newton affirmerait au fond l'attraction de l'énergie pour l'énergie. C'est la conclusion à laquelle aboutit M. Einstein : il a pu calculer la réfraction qui résulterait, pour la lumière venant d'une étoile vue dans une direction voisine de celle du soleil, de sa propagation dans le champ de gravitation produit par celui-ci. La vérification n'est peut-être pas impossible à tenter.

Voilà bien des problèmes dont la solution est sans doute prochaine. On ne peut qu'admirer le singulier détour par lequel la théorie des ondes lumineuses, si nettement opposée autrefois à la théorie newtonienne de l'émission, se trouve amenée après sa conjonction avec l'électromagnétisme, à conclure que le rayonnement est inerte et pesant et possède tous les attributs par lesquels autrefois on distinguait la matière. Nous sommes cependant bien loin du point de départ, puisque ce sont là des conséquences à partir des propriétés du milieu même qui transmet les ondes, propriétés que les travaux de Maxwell et Hertz nous ont révélées. La distinction entre la matière et le rayonnement reste fondamentale et doit être cherchée dans la notion de structure, dont la présence au sein de la matière de centres électrisés ou non, capables de se mouvoir avec une vitesse variable par rapport au milieu, alors que le rayonnement se propage dans celui-ci avec une vitesse entièrement déterminée.

25. Généralisation. — Nous pouvons, en terminant, généraliser la relation établie entre la masse initiale m_0 d'un corps et son énergie interne au repos E_0, évaluée par des observateurs O_0 immobiles par rapport à lui ; la même relation de proportionnalité subsiste entre sa masse m et son énergie totale E mesurées par des observateurs quelconques O_1 par rapport auxquels il est en mouvement. On a toujours :

$$m = \frac{E}{V^2}.$$

En effet, nous avons vu qu'il existe entre la masse du corps en mouvement et sa masse initiale, entre les masses d'un même corps mesurées simultanément par O_0 et O_1, la relation (17) :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

D'autre part, il résulte du principe de relativité que la même relation existe entre les énergies E_0 et E mesurées par O_0 et O_1 :

$$(24) \qquad E = \frac{E_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

La relation (20) conduit à la généralisation indiquée, en vertu de (17) et de (24). On peut donc dire que l'énergie totale d'un corps, au repos comme en mouvement, est égale au produit de sa masse par V^2. Si l'on acceptait comme on l'a proposé bien des fois avec juste raison, de prendre la vitesse de la lumière dans le vide comme unité fondamentale, on dirait : *la masse d'un corps est égale à son énergie totale,* traduisant ainsi de manière complète par une égalité numérique l'identité de nature que nous avons obtenue entre la masse et l'énergie : *la masse d'un corps mesure son énergie interne.*

Comme $\sqrt{1-\beta^2}$ est toujours inférieur à l'unité, il résulte de (24) que l'énergie d'un *même corps* (mis en mouvement sans changement d'aspect pour des observateurs qui lui sont liés) est plus grande en mouvement qu'au repos. La différence représente, par définition, l'énergie cinétique, et ce résultat nous explique la forme (17), en apparence un peu complexe, que nous avons obtenue pour l'énergie cinétique w. Les deux termes, $\frac{m_0 V^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$ et $m_0 V^2$, dont elle est la différence, ne sont autre chose que les deux mesures de l'énergie totale du même corps faites successivement en mouvement et au repos.