

Le mécanisme de la nature

Exposé simple des idées modernes
concernant la structure de la matière
et les radiations

PAR

E. N. DA C. ANDRADE

Professeur de Physique à l'Université de Londres

TRADUIT DE L'ANGLAIS

PAR

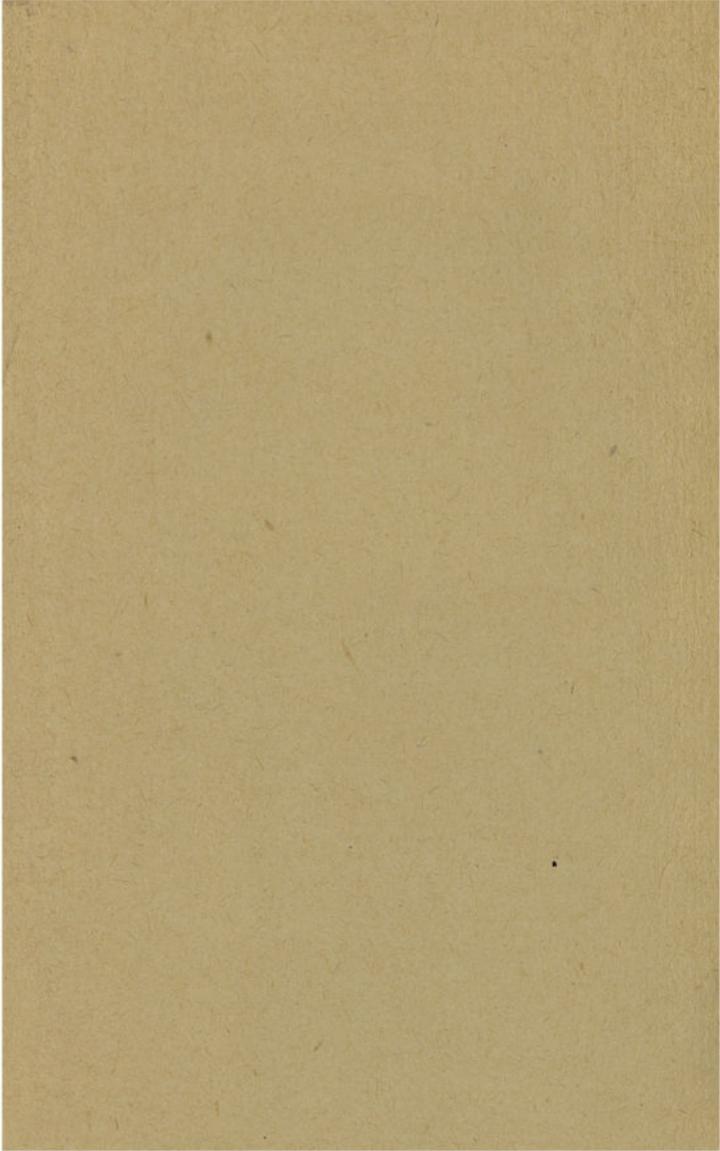
G. MALGORN

PARIS



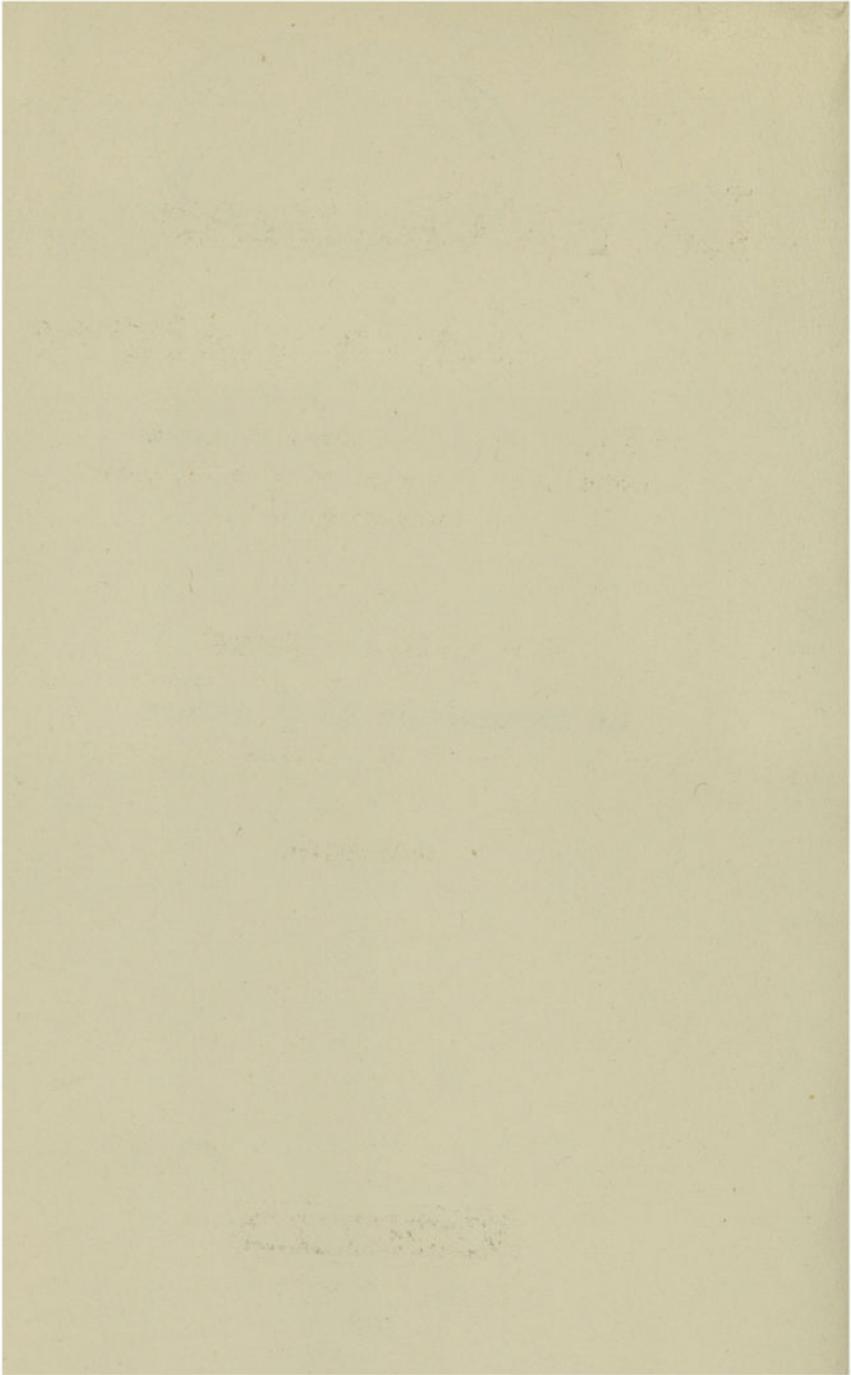
92, RUE BONAPARTE (VI)

1932



Le mécanisme de la nature

Class. déc. : 53 (075)



N° Rab 388080/-103855 BOUE 45

Le mécanisme de la nature



**Exposé simple des idées modernes
concernant la structure de la matière
et les radiations**

PAR

E. N. DA C. ANDRADE

Professeur de Physique à l'Université de Londres

TRADUIT DE L'ANGLAIS

PAR

G. MALGORN

PARIS



92, RUE BONAPARTE (VI)

1932

Tous droits réservés

Le mécanisme de la nature

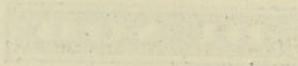
Exposé simple des idées modernes
concernant la structure de la matière
et les radiations

E. N. DE G. ANDRÉ

Professeur à l'Université de Lille

Éditions de la Librairie

G. MALBON



2, Rue du Lomb
LILLE

Dédié, avec mes sentiments cordiaux,
à
EDWARD BUXTON SKANKS
en témoignage de reconnaissance.

UNIVERSITY OF LILLIAD
LILLE
FACULTY OF SCIENCES
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

Préface

Comme je recherche ma principale distraction dans la compagnie de gens qui gagnent leur existence par des moyens moins désespérés que le service de la science, on me demande souvent d'expliquer en termes simples tel ou tel perfectionnement de la physique moderne. Il arrive souvent, cependant, que la chose m'est rendue extrêmement difficile par le fait que mon interlocuteur ne connaît rien à la question et ressemble à ces composés chimiques qui peuvent et désirent, pour ainsi dire, absorber la vapeur d'eau, mais ne peuvent le faire aisément s'ils sont trop desséchés : il leur faut une humidification préalable pour qu'ils puissent boire facilement.

Quand la demande m'a été faite d'un livre où se trouvent les éléments préliminaires, j'ai dû répondre que je n'en connaissais aucun et on m'a supplié d'en écrire un moi-même. « Il faut, m'a-t-on dit, qu'il soit court, car nous ne sommes plus jeunes et n'avons pas grand temps à consacrer au sujet : il doit être simple, car nous ne voulons pas avoir à nous débattre au milieu de termes incompréhensibles : il ne doit pas trop sentir l'école car nous ne sommes ni patients ni soumis à la contrainte qui fait que les livres de classe sont lus. Mettez-vous à l'ouvrage. »

Dans ce livre que j'ai écrit pendant mes vacances

je me suis efforcé d'exposer les bases de la science physique en les illustrant par des exemples tirés de ses progrès récents. J'ai écrit ce livre avec l'espoir qu'il pourra être lu en une heure ou deux par un lecteur non spécialisé. Il doit fournir une base suffisante pour permettre de comprendre les origines et les possibilités des principaux progrès annoncés de temps en temps dans les journaux. J'aurais préféré comme titre : « Brève introduction à la Philosophie naturelle » que je comptais primitivement donner à ce petit volume ; j'aime cet ancien mot de « Philosophie naturelle » et l'idée de science physique qu'il implique. Le titre, cependant, m'a semblé trop imposant pour une si petite chose, et je suis sûr qu'il aurait donné à beaucoup de lecteurs une impression fautive, car le sens des mots varie d'âge en âge.

Une longue préface pour un court volume équivaut à un long *Benedicite* devant un radis et un œuf. Je ne tomberai pas dans ce travers et je me contenterai d'espérer que ce plat modeste sera trouvé sain, et que, bien qu'insuffisant comme repas, il pourra mettre le lecteur en appétit et l'inciter à rechercher une nourriture plus substantielle là où elle se trouve.

Londres, mars 1930.

E. N. da C. ANDRADE.

LE MÉCANISME DE LA NATURE

CHAPITRE PREMIER

Qu'est-ce que la Physique ?

La physique cherche dans son domaine à reconstruire le monde, à le déduire par voie purement syllogistique d'un principe général une fois admis.

BOUASSE.

Le philosophe a le devoir d'étudier la nature générale des événements matériels et spirituels qui font la vie de l'homme, et d'essayer d'élaborer un plan qui servira à concilier des apparences contradictoires et à simplifier, par l'étude des premiers principes, la suite complexe des événements dont nous sommes les jouets. C'est à lui qu'incombe le soin de trouver une réponse à l'éternel « Pourquoi ? », que l'humanité troublée par les problèmes du bien et du mal, de la vie et de la mort, pose dans le balbutiement de l'enfance, et avec la voix rauque de l'agonie, depuis que l'homme est un animal pensant. La nature de l'apparence et de la réalité, la signification de la vérité et du mensonge, le but et la raison de notre connaissance, la signification de la conception de la beauté — tels sont quelques-uns des problèmes à la résolution desquels le philosophe peut exercer ses facultés. Ce sont là des questions très vastes et très

décevantes, difficiles à énoncer de façon satisfaisante, encore plus difficiles à résoudre. De nouveaux points de vue peuvent être trouvés, mais comment pouvons-nous juger si un progrès réel a été obtenu ?

La tâche de l'homme de science est plus modeste : il n'a pas à répondre à l'éternel « Pourquoi ? », mais au non moins éternel « Comment ? ». Il ne considère que les faits d'observation et essaie de les réduire en un système, de sorte que si nous admettons certains principes initiaux, les faits que nous savons systématiquement doivent s'ensuivre comme conséquence nécessaire, et une méthode pour en rechercher de nouveaux se suggère d'elle-même. Les principes eux-mêmes sont choisis pour s'adapter aux faits qui, pour le savant, sont d'importance capitale — les principes ne se démontrent pas. Que les principes soient vrais ou non au sens absolu, c'est là une question que le savant ne sait pas discuter : si leurs conséquences concordent avec la Nature ils sont vrais provisoirement. Les principes fondamentaux de la science sont donc souvent appelés « hypothèses provisoires », car ils sont établis dans le seul but de fournir une base sur laquelle un système peut être construit qui semble correspondre à la marche du monde matériel, chaque fois qu'il nous est possible de faire des mesures de comparaison. Nous considérons qu'un progrès a été accompli quand un plus grand nombre de phénomènes observés a été amené dans le champ de notre principe général.

Il s'ensuit qu'une théorie scientifique peut être abandonnée quand elle s'est révélée insuffisante, sans pour cela que l'on puisse crier à la faillite de la méthode scientifique. Considérons, par exemple, la

théorie atomique ¹. Il y a quarante ans, on considérait généralement les atomes comme des entités dures, non cassables, quelque chose comme des billes de billard extrêmement petites, chaque élément possédant un type parfaitement défini d'atome, foncièrement différent de celui d'un autre élément. Cette hypothèse était suffisante pour expliquer les propriétés des gaz, car, en supposant que les atomes de cette espèce fassent certains mouvements obéissant aux lois de la mécanique, on en déduirait mathématiquement des résultats concordant bien avec les propriétés des gaz telles que nous les observons au laboratoire. En prêtant aux atomes certaines forces d'attraction, ou affinités, il nous était possible d'expliquer les lois générales de la chimie. Puis vint la découverte de l'électron, beaucoup plus léger que l'atome, qui suggéra l'hypothèse que les différents types d'atome sont faits d'électrons. En outre, la découverte de la radioactivité montra que certains atomes, tels que ceux de la famille radium, peuvent émettre des particules chargées d'électricité et, ainsi, non seulement contiennent ces particules comme partie de leur structure, mais aussi doivent posséder en elles-mêmes une réserve d'énergie pour fournir l'énergie des radiations. La question se posa alors de savoir s'il fallait admettre cette énergie interne ou nier le principe de la conservation de l'énergie, car les éléments radio-actifs cèdent de l'énergie sans que de l'énergie leur soit fournie par nous. Le principe de la conservation de l'énergie s'est montré trop utile pour être abandonné, malgré la

¹ Discutée chapitre VII, où les termes non familiers recevront leur explication.

suggestion de certains. Les faits de la radio-activité nous ont obligés, cependant, à abandonner l'idée que l'atome est incassable, car les atomes d'un élément radio-actif se fragmentent et deviennent des atomes d'autres éléments. Les résultats des nouvelles recherches ne purent être expliqués qu'en supposant que l'atome avait une structure semblable à un système solaire minuscule, la masse de l'atome étant concentrée dans un noyau excessivement petit au centre, et le reste de l'atome consistant en électrons avec de larges intervalles entre eux. Cette image de l'atome est discutée dans le chapitre final de ce livre, où certains des résultats étonnants qu'elle explique sont décrits, mais ce que nous avons dit est suffisant pour montrer le changement qui s'est produit, en moins d'une génération, dans nos idées sur la question.

Est-il juste de reprocher au physicien ce changement en disant : *Il y a quarante ans, vous nous avez dit que les atomes étaient durs, invisibles et incassables, faits parfaits depuis le commencement des siècles et persistant sans usure dans cet état de perfection. Aujourd'hui, vous nous dites que les atomes sont des structures lâches qui peuvent être très aisément brisées : vous parlez d'atomes radio-actifs qui se fragmentent et se changent en atomes plus simples, et même vous spéculer sur la formation originale d'atomes plus lourds provenant d'atomes plus légers. Que devons-nous croire ? Vos théories acceptées par une génération sont abandonnées par la suivante : comment serions-nous sûrs que vous avez raison cette fois ?* Dans mon opinion, la réponse est que nous ne revendiquons pas l'absolue vérité pour nos théories : nous prétendons seulement qu'une théorie comme notre

théorie moderne des atomes offre de très gros avantages car tous les phénomènes connus jusqu'à présent sont exactement tels qu'ils doivent l'être d'après notre théorie. La nature, au point de vue qui intéresse le physicien, se comporte *comme s'il* y avait des atomes et *comme s'ils* avaient les propriétés que nous leur attribuons. L'ancienne conception des atomes suffisait à expliquer les phénomènes alors considérés, et nous pouvons encore l'utiliser pour certains problèmes plus simples pour lesquels l'introduction de l'idée de structure atomique conduit à des complications inutiles ; mais si nous voulons expliquer les faits de la radio-activité et de la spectroscopie, il nous faut introduire une nouvelle théorie. Cette dernière est meilleure que l'ancienne à un autre point de vue : elle ne repose — comme nous le verrons au chapitre VII — que sur deux éléments que l'on suppose composer l'atome, c'est-à-dire les *protons* et les *électrons*. Moins nous avons à considérer d'éléments fondamentaux pour expliquer les choses, meilleure est notre théorie. Nous ne prétendons pas que ce soit la dernière : une nouvelle découverte peut nous obliger subitement à modifier nos idées à certains points de vue, mais le succès de la théorie actuelle montre que nous aurons probablement à en conserver plusieurs caractéristiques générales. C'est une excellente hypothèse provisoire, car elle nous a montré une loi là où on ne l'avait pas encore découverte, et des liaisons entre divers phénomènes qu'on ne supposait pas connectés entre eux. Elle nous a permis de présenter les faits connus sous une forme plus commode et plus logique, et a conduit à la découverte de nouveaux faits très intéressants. Elle est justifiée par

les résultats, mais elle n'est pas définitive. La science est une chose vivante, et les choses vivantes se développent.

Certaines personnes pourraient être portées à aller plus loin et réclamer une réalité définie pour les atomes et les électrons, ainsi que pour le type de structure atomique défini précédemment. En réalité, que le savant considère ses atomes comme constituant ou non une réalité, n'affecte en rien la valeur de sa théorie ; cette dernière est tout aussi utile pour introduire l'ordre et conduire aux découvertes, qu'il s'agisse de simples fictions ou de réalités, et deux hommes différant d'avis à ce point de vue pourront encore, s'ils sont également bons mathématiciens, faire les mêmes prédictions basées sur la théorie et tirer les mêmes satisfactions de la vérification expérimentale. Prenons un exemple simple : deux hommes différents peuvent juger différemment un politicien déterminé, l'un prétendant qu'il est payé pour agir d'une certaine façon, l'autre croyant à son intégrité. Si, cependant, le politicien se comporte toujours *comme s'il* était conduit par l'intérêt, si toutes ses actions peuvent être expliquées sur cette base, et si la façon dont il votera en chaque circonstance peut être prévue exactement d'après cette hypothèse, celui qui pense en homme de science dans notre apologue dira : « Il m'est impossible de savoir s'il est payé ou non, mais puisque toutes ses actions peuvent être expliquées en prenant l'intérêt comme mobile, j'adopterai cette hypothèse car elle me facilite mon travail en me permettant de prévoir, sans efforts, tous les actes de ce politicien. Je ne juge pas, je me borne à observer et à classer mes observations. » Celui qui pense en

philosophe moraliste, se souciera plutôt de l'existence ou de la non-existence des pots-de-vin, mais il sera dans l'impossibilité de savoir exactement ce qui se passe dans la coulisse, et il ne pourra que se faire des idées spéculatives. A un problème si délicat il n'est pas possible de trouver une solution finale.

A ce point de vue, toute théorie scientifique particulière n'est qu'un outil provisoire avec lequel nous sculptons la connaissance du monde matériel en taillant dans le bloc de la Nature. Elle peut être à tout moment remplacée par une nouvelle théorie, mais cela équivaut à abandonner notre outil lorsque nous en trouvons un autre qui convient mieux. Refuser d'utiliser un outil parce qu'un jour on en trouvera peut-être un meilleur est pure folie : de même, ne pas utiliser une théorie qui a réussi à expliquer un grand nombre de faits et à suggérer de nouvelles lignes de recherches, parce qu'elle présente quelques points faibles et qu'elle est incapable d'expliquer d'autres faits, est une folie. Pour employer une autre métaphore, disons que l'histoire de la science peut, comme nous l'avons vu, être pleine de belles théories tuées par de misérables petits faits, mais ces théories ne sont pas mortes en vain si avant leur mort elles ont répandu dans la masse un grand nombre de faits indiscutables. D'ailleurs, les théories ne meurent pas définitivement en général : elles ressuscitent souvent avec une nouvelle caractéristique qui surmonte la difficulté ayant causé leur abandon temporaire.

La différence entre une croyance religieuse et une théorie scientifique est que la première offre pour les croyants un élément de vérité absolue : c'est un dogme sur lequel ils s'appuient et l'abandonner

équivalait au déshonneur et au péché. La théorie scientifique n'est vraie, par contre, qu'autant qu'elle est utile. Le savant ne considère sa meilleure théorie que comme un expédient pour l'aider sur sa route, et il est toujours à la recherche de quelque chose de mieux et de plus compréhensible.

Pour accentuer la nature pragmatique de l'hypothèse scientifique, le contraste entre la physique et la philosophie a été exposé, suivant une conception extrême. Certains philosophes, de l'école de William James, considèrent que, lorsque nous disons qu'une croyance est vraie, nous voulons simplement dire qu'elle est utile, que toute vérité est justifiée par l'expérience et pas autrement, tout comme l'est une théorie scientifique. En tout cas, le vrai philosophe ne peut pas, bien entendu, négliger les méthodes et les découvertes de la science, puisqu'elles s'appuient sur la nature de la connaissance et le type de raisonnement inductif. Quant au physicien, il doit s'intéresser à la recherche du caractère de ses hypothèses au point de vue de la logique. Autrefois, le terme « philosophie » était employé dans le sens le plus général, et ce que nous appelons maintenant physique était appelé philosophie naturelle (terme encore employé en Ecosse et qui mériterait d'être utilisé à nouveau) par opposition avec la philosophie morale. Tout cela est bien résumé dans une phrase du grand physicien mathématique Fourier : *Les causes primordiales ne nous sont pas connues, mais elles sont assujetties à des lois simples et constantes, que l'on peut découvrir par l'observation, et dont l'étude est l'objet de la philosophie naturelle.*

Jusqu'à présent, nous avons considéré la science

comme un tout, bien que n'ayant pas oublié l'existence d'une science des matières inanimées dans laquelle les vraies caractéristiques de la science se retrouvent, peut-être même plus fortement accentuées que dans les sciences biologiques, en ce sens que des méthodes plus exactes sont possibles. Dans les sciences telles que l'astronomie et la physique, les hypothèses sont présentées sous une forme adaptée à l'expression mathématique précise, et leurs conséquences peuvent être déduites avec la rigueur du raisonnement mathématique. Nous ne nous contentons pas de prédire qu'il se produira quelque chose : nous avons besoin de formules nous permettant de calculer la grandeur exacte de l'effet attendu, et nos observations ou nos expériences consistent en mesures précises que nous pouvons comparer, chiffre par chiffre, avec les résultats donnés par la théorie. Ainsi, en astronomie, nous ne nous contentons pas de savoir que les planètes tournent autour du soleil : nous avons besoin d'une théorie qui nous permette de déduire les orbites exactes des planètes et des comètes, en tenant compte des perturbations qu'une planète subit sous l'effet des autres. Le choix entre le système de Newton et le système d'Einstein en mécanique ne peut être fait que par un calcul exact des conséquences des deux théories dans certains cas extrêmes, lorsqu'il en résulte une légère différence numérique : nous demandons alors à la nature, par des mesures méticuleuses, laquelle est la bonne et nous nous en tenons à sa décision.

Les théories modernes de l'atome portent leur conviction en vertu de la concordance convaincante de leurs conséquences mathématiques, par exemple dans

le cas des mesures faites à l'aide du spectroscope. Pendant la guerre, certains hommes ingénieux, sachant que les aimants attirent le fer et l'acier, suggérèrent d'attirer les sous-marins au rivage à l'aide d'énormes aimants. Il est exact qu'un gros aimant exerce une force sur un sous-marin, mais les lois de l'attraction magnétique sont précises et nous permettent de calculer immédiatement que l'effet de l'aimant le plus gigantesque que nous puissions concevoir sera beaucoup trop faible pour le but proposé. Le calcul décide en dernier ressort. La première pensée du physicien en projetant une expérience est d'essayer de calculer la grandeur de l'effet à attendre, de façon à voir s'il est mesurable, et tout progrès dans la théorie repose sur un certain nombre de mesures fastidieuses faites par les précédents investigateurs. La théorie de la relativité elle-même, bien que constituant une structure logique complète, est due à la recherche infructueuse d'un très léger effet qui était la conséquence mathématique des théories courantes.

Il nous faut maintenant essayer d'indiquer le but particulier de la science de la physique, ou plutôt sa relation avec les autres sciences exactes. La physique étudie l'aspect matériel du monde inanimé et s'intéresse particulièrement aux opérations dans lesquelles la nature de la matière ne change pas. Si la nature de la matière change, comme par exemple lorsque le cuivre et l'acide sulfurique forment le sulfate de cuivre, l'étude relève du domaine de la chimie. Pour préciser, disons que les propriétés de la matière dans le sens que nous venons d'envisager, ainsi que celles de l'énergie et des radiations dans leurs nombreuses formes, relèvent de la physique. Les livres scolaires

groupent généralement le sujet sous les titres : propriétés de la matière (qui comprennent les sujets tels que la pesanteur, l'élasticité, les frottements de tous genres, et les diverses propriétés des liquides, telles que la tension superficielle) ; chaleur ; optique ; acoustique ; électricité et magnétisme. Cette division est très arbitraire, et ce que nous devons inclure sous chaque titre l'est au moins autant. La physique, dans son effort pour découvrir les lois exactes concernant la manière dont se comportent la matière et les radiations, est la plus fondamentale des sciences expérimentales ¹, car elle est la plus précise et la plus mathématique, et tient sa place dans toutes les autres : au fur et à mesure qu'elles tendent à devenir plus exactes, elles se rapprochent aussi de plus en plus du but de la physique. La façon dont la physique se mêle aux autres sciences peut être illustrée par quelques exemples.

Les mathématiques, bien entendu, se retrouvent dans chaque branche de la physique et, en revanche, les recherches physiques sur certains sujets tels que la conduction de la chaleur ont conduit à de nouvelles méthodes de mathématiques appliquées. La géométrie, surtout la géométrie non euclidienne, est des plus utiles pour l'étude de la relativité. La détermination des forces de pesanteur, qui est une branche de la physique, est de grande importance pour l'astronomie. L'Astrophysique, qui est la science déterminant la constitution physique et la vie physique des corps

¹ En parlant des sciences expérimentales, nous exceptons l'astronomie qui est une science d'observation et non strictement expérimentale, et aussi, bien entendu, les mathématiques qui sont la base de la physique.

célestes, en particulier du soleil, est simplement l'application de la physique terrestre à des fins célestes. Dans certaines parties de la chimie, telles que les propriétés électriques des solutions de différentes substances chimiques, la physique se retrouve à un point tel qu'une branche spéciale de la science, dans laquelle des centaines de chercheurs sont engagés, est appelée la chimie physique, tandis qu'en chimie organique l'application des rayons X par le physicien a produit d'importants résultats concernant le groupement, et l'arrangement dans l'espace, des atomes dans les molécules de composés organiques. En dehors de ce fait, cependant, il est maintenant nettement reconnu que les forces de combinaison chimique sont de nature électrique, de sorte que la physique joue maintenant un rôle capital en chimie générale. La cristallographie, et par suite la minéralogie, sont également tributaires de l'analyse par les rayons X de la structure cristalline. En géologie, la question de l'âge de la terre est un sujet dans lequel intervient la physique, la radio-activité, en particulier, ayant contribué à éclaircir la question. En botanique et en médecine, les méthodes physiques deviennent de plus en plus indispensables. Même en philologie qui est la science de la parole, la physique sert à l'étude des sons de voyelles qui implique la question de la résonance des cavités de la bouche et de la gorge, et à d'autres études du même genre. La météorologie qui est la science du temps, dépend de la physique, surtout en ce qui concerne l'électricité atmosphérique sous tous ses aspects, y compris l'effet électrique concernant l'agrandissement et la division des gouttes de pluie. Une nouvelle science de la physique de la terre

(ou géophysique, comme on l'appelle) étudie des sujets tels que la propagation des tremblements de terre et les aurores boréales. Les applications pratiques de la physique au génie civil et à l'électricité sont si nombreuses qu'il est impossible de les mentionner toutes, et elles sont si familières que cela est inutile. La physique voit son champ d'action s'étendre chaque année, et les instruments inventés et perfectionnés par le physicien — le microscope, le télescope, le galvanomètre — voient leur usage se développer de plus en plus.

Au point de vue physique, nous connaissons une grandeur quand nous pouvons la mesurer de façon précise et trouver les relations exactes entre elle et les autres grandeurs qui peuvent être ramenées dans le champ de nos quelques principes fondamentaux. C'est ainsi que nous savons quelque chose de la capacité calorifique des différentes matières, c'est-à-dire que nous pouvons mesurer la quantité de chaleur qu'il faut pour élever d'un degré de température le poids unité d'une substance, quantité qui est appelée la chaleur spécifique, si nous prenons l'eau comme étalon, de même que la densité est le poids spécifique si nous prenons l'eau comme étalon. C'est une quantité précise pour chaque matière : ainsi, nous disons que la chaleur spécifique de l'aluminium à la température ordinaire est de 0,219 par exemple. Nous savons aussi que la chaleur spécifique dépend de l'élasticité du corps et de sa composition chimique. Mais au point de vue physique, nous ne savons à peu près rien de la plasticité, cette propriété qui rend l'argile si précieuse au potier. Le potier ou le sculpteur peut dire au toucher ou par expérience si une argile est en état

d'être travaillée, mais la science n'a pas encore trouvé le moyen de mesurer cet état : nous ne savons pas comment essayer une argile et donner un chiffre proportionnel à sa valeur — un coefficient de plasticité, dirons-nous ; nous ne saurions dire, par exemple, qu'une argile est 1,49 fois plus plastique qu'une autre. Nous ne pouvons donc pas établir de relation entre la plasticité et les autres propriétés. La mesure est le commencement de la connaissance physique.

D'après ce que nous avons dit, il est clair qu'il nous faut certaines conceptions et lois que nous considérons comme fondamentales, tout comme un jeu comporte certaines règles fondamentales. Si quelqu'un vous demande pourquoi dans le jeu de tennis le joueur perd un point lorsqu'il envoie la balle au delà de la ligne, la seule réponse est qu'il en a été décidé ainsi à l'avance : la question est sans signification si le questionneur désire une explication en fonction de la couleur des cheveux du joueur et de la température de l'air. Mais la question « Qu'est-ce que l'électricité ? » — si souvent posée — est tout aussi absurde et, il est probable que ceux qui la posent n'ont jamais réfléchi au genre de réponse qu'ils attendaient. L'électricité est une des conceptions fondamentales de la physique : il est absurde d'exiger qu'on la définisse en disant que c'est une espèce de liquide ou bien une espèce de force, attendu que nous expliquons les propriétés des liquides en termes d'électricité, et la force électrique est peut-être la conception fondamentale de la physique moderne. Le physicien peut vous dire ce qu'il entend par une charge électrique : il vous dira que lorsque des corps sont dans un certain état, ils se repoussent ou s'attirent de certaines façons et qu'il considère alors

les corps comme électriquement chargés, pour décrire facilement cet état. Il peut vous dire les propriétés de ces charges au repos et en mouvement, la connexion entre les charges mobiles et le magnétisme, les circonstances dans lesquelles il se produit un passage d'énergie électrique, comment l'énergie électrique peut être convertie en d'autres formes d'énergie, et bien d'autres choses encore au sujet de l'électricité. En résumé, la question correcte est : « Que fait l'électricité ? » et non : « Qu'est-ce que l'électricité ? ». La première question a un sens déterminé et on peut lui répondre ; la seconde est absurde car l'interlocuteur ne la pose pas d'une façon permettant de comprendre ce qu'il veut savoir. S'il veut dire : « Pouvez-vous exprimer ce que vous savez au sujet de l'électricité en fonction de quelque chose de plus fondamental ? », la réponse est : « Non ». Il faut bien qu'il y ait en physique un mur derrière lequel nous ne pouvons pas aller : si ce n'était pas l'électricité, ce serait autre chose.

Maintenant que nous avons brièvement considéré le genre de connaissance que constitue la physique, nous pouvons discuter, très succinctement, quelques-uns des résultats généraux de la science.



CHAPITRE II

Au sujet de la Chaleur et de l'Énergie

L'énergie se retrouve dans chaque branche de la physique, et on pourrait définir la physique comme l'étude de l'énergie et de ses transformations. La conception de l'énergie sous sa forme générale est, cependant, relativement récente car le principe de la conservation de l'énergie n'a été énoncé qu'en 1847. Voyons ce dont il s'agit.

Quand un corps se déplace sous l'influence d'une force, nous disons que du travail a été effectué, et nous mesurons ce travail en multipliant la force dans la direction du mouvement par la distance dont le corps s'est déplacé : les ingénieurs, par exemple, mesurent le travail accompli en kilogrammètres. Si un agent possède le pouvoir d'effectuer du travail, nous disons qu'il possède de l'énergie, et nous mesurons la variation d'énergie par le travail effectué.

Or, l'énergie mécanique possédée par un solide, un liquide ou un gaz peut être de deux sortes : celle qu'un corps possède en vertu de son mouvement, appelée « énergie cinétique » et celle qu'il possède en vertu de sa position, appelée « énergie potentielle ». Le vent, par exemple, possède une énergie cinétique en vertu du déplacement de l'air : il peut entraîner

un moulin à vent qui engendre du travail. L'air, en tombant sur la voile du moulin se déplace plus vite que l'air qui sort de l'autre côté. Il a donc perdu de la vitesse à la sortie, et la perte d'énergie de mouvement se transforme en travail du moulin. De la même façon, dans la turbine à eau, le courant d'eau perd de sa vitesse en passant à travers les aubes de la turbine ; dans la turbine à vapeur, la force vive de vapeur sert à produire du travail lorsque celle-ci passe à travers les ailettes. Un moteur pourrait être actionné en tirant des balles de fusil dans une roue à aubes en bois massif, l'énergie cinétique des balles étant convertie en travail effectué par la roue. D'autre part, dans une horloge, l'énergie qui l'actionne est dérivée de la position. Dans les anciens types d'horloges à poids, les poids étaient élevés quand l'horloge était remontée et perdaient leur énergie de position au fur et à mesure que la force de la pesanteur les faisait lentement descendre ; le ressort d'une pendule possède également de l'énergie une fois tendu, et il la perd lorsqu'il se déroule sous l'influence de la tension du ressort qu'on a remonté. Dans un manège de montagnes russes, chaque voiture possède une certaine réserve d'énergie lorsqu'elle se trouve au haut de la pente.

Or, il est évident que l'énergie cinétique peut être transformée en énergie potentielle. La voiture de notre manège de montagnes russes nous en donne un bon exemple. Lorsque la voiture descend, elle prend de la vitesse qui ne fait que croître jusqu'à ce qu'elle atteigne le point le plus bas de sa course quand son énergie potentielle est minimum : en remontant la pente, elle gagne de l'énergie potentielle et perd de l'énergie cinétique. S'il n'y avait aucun frottement,

elle remonterait à la hauteur d'où elle est partie, mais en pratique, il n'en est pas ainsi et elle ne remonte que jusqu'à une hauteur sensiblement inférieure à celle du point de départ. Puisqu'en ce point elle a pratiquement perdu toute son énergie cinétique gagnée à la descente, et possède une moins grande énergie potentielle qu'au départ, c'est qu'une certaine quantité d'énergie a été perdue. Cette énergie est l'énergie nécessaire pour pousser la voiture en dépit des frottements. La claire réalisation de l'histoire de cette énergie perdue a marqué un des tournants les plus importants de la physique au dix-neuvième siècle.

On avait bien reconnu depuis longtemps que cette énergie cinétique est susceptible d'être transformée en énergie potentielle, et vice versa, mais il restait à trouver le grand principe de la conservation de l'énergie, c'est-à-dire à imaginer que la chaleur est une forme d'énergie et que si de l'énergie mécanique disparaît par frottement, de la chaleur est engendrée. C'est un fait bien connu que des roulements mal graissés s'échauffent considérablement quand le frottement est élevé, mais en général la chaleur engendrée dans les roulements est faible et échappe à l'attention. Un poids tombant sur le sol acquiert de l'énergie de mouvement, mais ce mouvement disparaît quand le poids atteint le sol. Il réapparaît sous forme de chaleur, le poids et le plancher étant légèrement plus chauds, mais la quantité d'énergie en question ne représente pas une chaleur suffisante pour être aisément observable. Il y a cependant des cas où la quantité de chaleur ainsi engendrée est très grande. A l'Arsenal de Portsmouth, il existe une machine à étamper qui perce de gros trous de rivets dans des plaques d'acier

très épaisses. La quantité de travail effectué pour forcer le poinçon à travers la plaque est naturellement très grande. Une distraction favorite de l'ouvrier actionnant la machine est de ramasser dans sa main calleuse le bouchon métallique tombé sur le sol et de le tendre au visiteur curieux qui le laisse tomber immédiatement, tellement il est chaud. L'énergie est transformée en chaleur.

C'est le physicien Joule qui a montré l'exacte équivalence de la chaleur et du travail mécanique ; chaque fois que du travail mécanique disparaît, non seulement de la chaleur est engendrée, mais une quantité d'énergie exactement proportionnelle à l'énergie semble perdue. Le travail peut être fait de diverses façons : en frottant des pièces métalliques l'une sur l'autre, ou en remuant de l'eau ¹, ou — ce qui est plus

¹ Le travail produit en remuant de l'eau de la façon ordinaire, c'est-à-dire en remuant une tasse de thé, est très faible, de sorte qu'aucune quantité appréciable de chaleur n'est engendrée : en remuant le thé, on le refroidit, car de nouvelles couches de thé chaud sont mises en contact avec l'air froid et la tasse froide. Si, cependant, on utilise un moulinet compliqué avec des palettes très rapprochées des parois de la tasse, il peut être très difficile de le faire tourner, et en raison du travail fourni, de plus grandes quantités de chaleur sont produites, qu'on peut mesurer avec soin. Il est intéressant de signaler que J. R. Mayer, aux environs de 1842, fut un des premiers à imaginer l'équivalence de la chaleur et du travail ; un jour qu'il exposait ses idées à son ami Jolly, celui-ci objecta : « Mais dans ce cas, l'eau doit s'échauffer si vous la remuez », ce qui lui semblait absurde. Mayer le quitta sans dire un mot, mais quelques semaines après, il entra en coup de vent dans la chambre de son ami, disant : « Il en est bien ainsi », car il s'imaginait que, tout comme lui, son ami n'avait pas pensé à autre chose pendant ce temps. Il avait eu recours à l'expérience ; il avait demandé à la Nature de décider.

important pour nous — électriquement, en poussant des charges électriques à travers un fil à l'aide d'une force électromotrice ou, en termes plus usuels, en faisant passer un courant électrique à travers une résistance. La chaleur est une forme d'énergie. Non seulement le travail se transforme en chaleur chaque fois qu'il y a frottement, y compris le « frottement » de l'électricité passant à travers un fil (transformation nettement visible dans la lampe électrique ou le radiateur électrique), mais aussi de la chaleur peut être transformée en travail. Dans toute machine à vapeur, il y a disparition de chaleur correspondant au travail effectué. Si l'on mesure la chaleur totale engendrée par le foyer, et si l'on tient compte de la chaleur cédée à l'eau du condenseur, il n'y a pas autant de chaleur gagnée par les objets environnants que si la même quantité de combustible était brûlée sans qu'il y ait entraînement de machine.

Il existe diverses autres formes d'énergie. Le son peut être considéré comme de l'énergie mécanique, ainsi que nous le verrons chapitre III. La lumière, de même que toutes les radiations telles que les rayons X ou les ondes radioélectriques sont aussi une forme d'énergie. L'énergie des radiations est, en général, mesurée sous forme de chaleur, ce qui donne un autre exemple de la façon dont la conception de chaleur sous forme d'énergie envahit toute la physique moderne. Supposons, par exemple, qu'il faille mesurer l'énergie d'une lumière rouge d'une certaine longueur d'onde. La lumière est envoyée sur une bande de métal noirci qui l'absorbe, ou peu s'en faut, complètement, car aucune lumière n'est réfléchiée. L'énergie de la lumière est transformée en chaleur et la bande

s'échauffe ; cette légère élévation de température est mesurée par des méthodes électriques délicates. La quantité de chaleur nécessaire pour produire l'élévation de température étant calculée, l'énergie équivalente est l'énergie de la lumière. L'énergie d'une onde radioélectrique peut être mesurée de façon semblable par l'effet d'échauffement.

La chaleur est donc une forme d'énergie. Le travail mécanique peut toujours être converti en chaleur, et cette conversion s'accomplit tout autour de nous dans la Nature. Au pied d'une chute d'eau, là où l'élan de l'eau est brisé et dissipé en tourbillons et en remous, l'énergie de mouvement est remplacée par un léger échauffement de l'eau ; l'eau de la mer bouleversée par la tempête est plus chaude que celle de l'océan calme, toutes choses égales d'ailleurs ; le météore en tombant s'échauffe car son mouvement est contrarié dès qu'il atteint l'atmosphère terrestre. Dans certaines conditions, le processus inverse — la transformation de chaleur en travail — peut se produire. Le fait que les occasions de cette conversion sont limitées n'est pas en contradiction avec ce que nous avons dit, à savoir qu'une quantité donnée de travail équivaut toujours à une quantité déterminée de chaleur : le fait que nous ne pouvons acheter du pain qu'à certaines heures et dans certains magasins n'empêche pas que le prix du pain soit fixé quand nous l'achetons.

Les relations entre la chaleur et le travail constituent la base de la science de la thermodynamique, qui signifie littéralement la science de la « chaleur puissance ». Mais la méthode thermodynamique ne s'inquiète pas de connaître la nature de la chaleur, c'est-à-dire de savoir si c'est un déplacement des

molécules ou quelque chose comme le tremblement d'une gelée, ou autre chose encore. En thermodynamique, on se contente de dire que l'on peut mesurer l'énergie calorifique de diverses façons, que l'on a une conception de l'état appelé température, que l'on peut pareillement définir et mesurer, et enfin que l'on peut mesurer le travail mécanique. Notre but est de trouver des relations qui régissent la façon dont se comportent les quantités mesurées. La première grande relation est celle que nous avons déjà mentionnée, à savoir qu'une certaine quantité de travail équivaut à une quantité précise de chaleur, quelle que soit la façon dont ce travail est converti en chaleur. C'est là la première loi de la thermodynamique et, si nous semblons insister un peu trop sur ce sujet, il faut tenir compte du fait que nous touchons à la pierre angulaire de la physique. Cette loi renferme l'impossibilité du mouvement perpétuel, car nous voyons que nous ne pouvons tirer de l'énergie d'une machine qu'en lui fournissant une quantité d'énergie au moins égale sous une forme ou une autre, soit de l'énergie mécanique, soit de l'énergie électrique ou calorifique. La loi ne fait d'ailleurs que confirmer l'expérience, et toute observation soigneuse et sincère ne peut que concorder avec la loi tandis que toute exception apparente est fautive comme le montre une vérification plus attentive. Les machines ordinaires du soi-disant mouvement perpétuel sont des types parfaitement connus, mais il faut parfois un peu d'ingéniosité pour trouver le point faux du raisonnement. Il sera tout aussi profitable d'organiser une expédition pour trouver un endroit où les poids tombent vers le ciel que de perdre son temps à imaginer des machines avec tiges, leviers,

boules, pompes, cames... ¹. Personne ne peut affirmer qu'il n'existe pas quelque part sur la terre un endroit où les corps tombent vers le haut, étant donné qu'il existe encore des terrains inexplorés quant à la chute des corps, mais s'il en était ainsi ce serait l'écroulement des bases les plus stables de la structure de la science. La plupart des inventeurs de machines à mouvement perpétuel (et il en existe encore beaucoup à en juger d'après ma correspondance) sont les victimes de leur imagination, mais il en est aussi qui sont des personnages suspects qui recueillent de l'argent pour fonder des sociétés dans le but d'exploiter leur invention. Etant donné, cependant, que la plupart des gens, même les hommes d'affaires arrivés ², comprennent aujourd'hui que l'on ne peut obtenir de l'énergie en partant de rien, ces inventeurs modernes ont imaginé des machines dans lesquelles une petite quantité d'énergie est transformée en une beaucoup plus grande. Ceci se prête à des explications pseudo-scientifiques très plausibles, mais est tout aussi absurde et tout aussi en contradiction avec la première loi de la thermodynamique.

La première loi ne nous dit rien, cependant, au sujet des conditions nécessaires pour la conversion de chaleur en travail. On pourrait croire à la possibilité

¹ Les lecteurs intéressés par la question trouveront l'histoire complète des divers types de machines à mouvement perpétuel inventées jusqu'à 1860, dans le livre d'Henry Dircks *Perpetuum Mobile : Or Search for Self-Motive Power*, 1861-1870. Ce livre est très rare, surtout le second volume, mais on peut encore le trouver dans certaines grandes bibliothèques.

² Apparemment, la classe de gens la plus crédule ; en tout cas, la seule qui continue à fournir des victimes dans cet ordre d'idées. Voir la presse populaire, *passim*.

de monter une machine au bord d'un lac, de tirer de la chaleur de l'eau du lac et de transformer cette chaleur en travail. S'il en était ainsi, le lac deviendrait simplement plus froid que le pays environnant, et cela nous ferait une alimentation de chaleur, au moyen de laquelle nous pourrions faire tourner notre machine tout comme si nous utilisions un courant d'eau pour faire tourner une turbine à eau. Le mouvement d'un courant d'eau, cependant, sert à nous rappeler que nous ne pouvons pas, d'un lac, obtenir un courant d'eau à moins que nous ne fassions couler l'eau à un niveau inférieur : si de l'eau est utilisée pour faire tourner les roues, elle doit être à un niveau plus élevé que son voisinage. La même chose exactement se produit dans le cas de la chaleur : pour pouvoir convertir une partie de cette chaleur en travail, la chaleur fournie doit être à une température plus élevée que le milieu ambiant. Aussi, ne pouvons-nous pas utiliser la chaleur des lacs et des étangs (je choisis l'exemple de masses d'eau, car la capacité calorifique de l'eau est beaucoup plus élevée que celle de la pierre, par exemple, et parce que la circulation possible dans l'eau servirait à utiliser la chaleur s'il était possible de le faire) et la transformer en travail ; mais nous ne pourrions pas davantage utiliser la chaleur du foyer d'une turbine à vapeur si l'ensemble de la salle des machines était à la même température. Il nous faut un condenseur à une température inférieure à celle du foyer ¹, si nous voulons utiliser la

¹ Dans le cas d'une machine sans condenseur, telle qu'une locomotive, l'air environnant constitue le milieu à température plus basse.

chaleur du foyer, et plus grande est la différence de température entre la chaudière et le condenseur, plus grande est la fraction de chaleur qui peut être convertie en travail. C'est pourquoi on s'efforce actuellement d'employer de la vapeur à une pression de plus en plus élevée : plus la pression de vapeur est élevée, plus la température est élevée et meilleur est le rendement. La vapeur en elle-même ne peut rien : sur une planète chaude, toute l'eau serait de la vapeur. et pourtant aucune machine à vapeur ne pourrait être actionnée en l'absence de condenseur.

La seconde loi de la thermodynamique implique la propriété suivante de la chaleur : nous ne pouvons pas convertir la chaleur en travail si nous n'avons pas une différence de température : plus grande est cette différence, plus grande est la fraction que nous pouvons utiliser, la fraction non utilisée demeurant, bien entendu, sous forme de chaleur, puisqu'il ne peut pas y avoir de perte d'énergie dans l'ensemble. Les applications en sont évidentes, mais la loi a une telle importance générale qu'elle peut être largement utilisée en physique et en chimie et, si elle est utilisée avec suffisamment de précautions, elle peut être appliquée à l'univers. Mais il ne faut l'utiliser qu'avec précaution et nous avons là un excellent exemple de la nature d'une théorie physique qui est construite pour certains types de problèmes et ne peut être utilisée pour d'autres types. Les lois de la thermodynamique sont, de par leur essence, des lois moyennes, c'est-à-dire que nous n'avons aucune raison de supposer qu'elles sont vraies pour les atomes simples, ou pour les petits assemblages d'atomes, car nous ne considérons jamais que des substances contenant des millions

et des millions d'atomes lorsque nous faisons les mesures de chaleur, sur lesquelles elles sont basées.

Un restaurateur chargé de la nourriture de plusieurs milliers d'hommes pourra baser ses commandes sur la base que chaque millier d'hommes mange tant de saucisses, tant de pain..., mais ces chiffres ne lui apprendront rien en ce qui concerne la nourriture de chaque homme considéré individuellement : il y en a qui ne mangent pas de saucisses, d'autres qui en mangent plus que leur part. S'il lui fallait calculer ces chiffres pour une partie différente du pays, il vaudrait mieux qu'il détermine les besoins de chaque personne dans les conditions différentes et, d'après cela, qu'il calcule les besoins de la foule. Ceci correspond à l'autre méthode d'étude des problèmes de la chaleur dont il va être question maintenant, à savoir la théorie atomique. Elle offre l'inconvénient par rapport à la méthode thermodynamique, de demander des connaissances initiales plus détaillées ; pour la pratique des machines, par exemple, alors que nous savons que les méthodes thermodynamiques sont en général suffisantes, ce serait une complication inutile que de considérer le façon dont se comportent les atomes. Par contre, la théorie atomique offre ce grand avantage qu'il nous est possible, si nous avons les connaissances nécessaires, d'avoir une idée du fonctionnement de la machine Nature, ce qui nous permet d'aller plus loin que les effets généraux et d'examiner la multitude des complications minuscules dont ces effets généraux sont les manifestations.

Au point de vue de la théorie atomique, nous pouvons dire immédiatement que l'énergie calorifique n'est autre que l'énergie de mouvement (à laquelle

doit être ajoutée dans certains cas l'énergie potentielle) des molécules dont la matière est composée. Considérons un gaz, par exemple. Il consiste en molécules, plus complexes dans certains gaz, moins complexes dans d'autres, mais en tous cas d'environ deux cent-millionièmes de centimètre en *long*, séparées par des intervalles relativement grands, se déplaçant dans toutes les directions avec une vitesse moyenne mesurée en centaines de mètres par seconde. Les molécules se heurtent les unes aux autres, et perdent ou gagnent de la vitesse du fait du choc, de sorte que toutes les vitesses depuis les plus grandes jusqu'aux plus petites, sont représentées. Les molécules individuelles auront donc des énergies cinétiques de mouvement en ligne droite très différentes ; mais à une température déterminée, si plusieurs millions d'entre elles sont considérées, il y aura une certaine énergie cinétique moyenne déterminée. Les molécules seront aussi animées d'un mouvement de rotation à la suite des collisions et auront aussi une énergie d' « effet », le mot « effet » étant pris dans le sens usuel de la bille de billard, de la toupie ou de l'obus tiré par un canon qui ont de l'effet sur eux-mêmes et se déplacent en avant en même temps, avec la différence que la molécule peut tourner autour d'un axe dans n'importe quelle direction. Les molécules consistent, en général, en atomes maintenus ensemble par des forces électriques, et les atomes peuvent aussi vibrer, comme si les molécules étaient faites de balles reliées ensemble par des ressorts, de sorte que la molécule peut posséder une énergie de vibration cinétique et potentielle, tout comme un pendule. En résumé, chaque molécule possède une certaine quantité de ce que nous pouvons

appeler énergie mécanique de diverses espèces. Plus chauds sont les gaz, plus rapide est le mouvement de leurs molécules, ou, pour s'exprimer de façon plus précise, plus grande est l'énergie moyenne des molécules. Le processus réel de l'échauffement peut s'expliquer ainsi : les molécules de la flamme ou du corps chaud, au contact duquel nous mettons le récipient contenant le gaz, ont un déplacement plus rapide que celles du récipient froid, et, en se heurtant à ces dernières, leur communiquent un peu de leur énergie. Les molécules du récipient, à leur tour, frappent vigoureusement les molécules de gaz en entrant au contact avec elles, jusqu'à ce qu'elles prennent elles aussi de l'énergie. Si le récipient est fermé, le choc plus accentué des molécules de gaz contre ses parois produit l'élévation de pression que nous observons quand un gaz est chauffé en vase clos.

Dans un liquide, nous trouvons pareillement l'énergie de mouvement de la molécule, mais elle n'est pas si simple à analyser car, tandis que, dans un gaz, les molécules ont des trajectoires relativement longues et droites entre les collisions, dans un liquide, elles sont si serrées que le mouvement est contrôlé par les forces des molécules voisines. Dans un solide, les molécules sont ancrées en des points définis par les forces de cohésion et vibrent autour de ce point comme des balles maintenues par des ressorts. Dans tous les cas, cependant, l'énergie calorifique est simplement l'énergie impliquée dans le mouvement des molécules.

Le mouvement des molécules est un déplacement désordonné. Si nous pouvions fixer les yeux sur une molécule donnée et suivre sa carrière, nous la verrions se déplacer tantôt dans une direction, tantôt dans une

autre totalement différente, et si nous pouvions jeter un regard d'ensemble sur toutes les molécules, nous verrions que les différentes molécules se déplacent dans des directions différentes. Au lieu de se comporter comme des soldats bien exercés, elles ressemblent à une foule sans but. Cela est en contraste avec ce qui se passe quand un morceau de bois est poussé dans une direction donnée, sur une table, par exemple. Chaque molécule du morceau de bois a, maintenant, outre son mouvement irrégulier, un mouvement parfaitement défini qu'il a de commun avec toute autre molécule du morceau : le mouvement réel d'une molécule donnée sera obtenu, naturellement, en considérant l'effet combiné du mouvement déterminé et du mouvement irrégulier. En déplaçant le morceau de bois d'un bloc, nous avons introduit un élément d'ordre dans le mouvement. Si nous donnons une simple poussée au morceau de bois, il s'arrête bien vite par suite du frottement, et nous savons que de la chaleur sera engendrée en frottant le long de la table. Cette génération de chaleur signifie, comme nous l'avons vu, une augmentation générale du mouvement irrégulier des molécules dans le voisinage des surfaces où se fait le frottement. En d'autres termes, au lieu de dire que notre énergie mécanique a été convertie en chaleur, nous dirons que l'énergie du mouvement régulier que nous imposons aux molécules en poussant le morceau de bois a été convertie en énergie de mouvement irrégulier des molécules. C'est là une tendance générale de la Nature. La régularité de mouvement tend à disparaître et à être remplacée par un mouvement moléculaire irrégulier.

Prenons quelques exemples. Supposons que nous

ayons deux corps à des températures différentes, dans une salle, par exemple, un foyer et une chaudière. Les molécules de gaz du foyer ont une plus grande énergie moyenne que les molécules d'eau de la chaudière. Si aucune intervention ne se produit, une température uniforme s'établira dans la salle : le feu du foyer s'éteindra et sa chaleur se sera répartie entre les diverses parties de la salle. Un million de molécules prises en un endroit auront exactement la même énergie moyenne qu'un million de molécules en un autre endroit. A l'aide d'une machine, nous aurions pu convertir une certaine quantité de chaleur du foyer en travail ; nous aurions pu, par exemple, faire tourner une dynamo et charger des accumulateurs qui entraîneraient un des anciens modèles de voitures électriques. C'est là un mouvement régulier coordonné, toutes les molécules de la voiture ayant une direction commune imposée. Mais que se passera-t-il quand, après avoir couru les routes, nous serons de retour ? L'accumulateur sera épuisé et nous en serons au point de départ, en ce qui concerne l'énergie. Où cette dernière a-t-elle disparu ? En frottement des roues sur la route, des essieux dans leurs boîtes, du châssis contre le vent. Toute notre régularité a disparu et a été remplacée par le mouvement irrégulier supplémentaire résultant du léger échauffement de la route, des boîtes d'essieux, du vent, et du châssis. La nature a triomphé. Nous pouvons donc dire que l'homme est tenu à une lutte incessante pour imposer un élément de régularité utile pour lui-même, au mouvement irrégulier des corps qui composent notre monde.

Si nous considérons des corps de dimensions visibles, contenant des millions de millions de molé-

cules, nous sommes conduits exactement au même résultat, que nous appliquions les lois de la thermodynamique ou la méthode individuelle de la physique moléculaire. Mais supposons que nous considérions les molécules elles-mêmes ou de très faibles parties. Les molécules dans un corps donné sont en mouvement perpétuel : si le corps est à une température élevée, le mouvement moyen est plus rapide que si le corps est à une basse température. Nous savons, cependant, que dans le corps considéré, certaines des molécules seront animées d'un mouvement très rapide, et les autres d'un mouvement très lent : la température que nous mesurons à l'aide du thermomètre n'indique qu'une moyenne. Supposons que nous puissions ramasser tous les petits (inconcevablement petits) morceaux où les molécules sont en état de déplacement rapide et les mettre ensemble en un endroit, et tous les petits morceaux où les molécules sont relativement tranquilles, et les mettre en un autre endroit ; nous obtiendrons ainsi d'un corps à une certaine température, deux morceaux que les thermomètres montreraient être à une température différente. Pour s'imaginer la manière dont ceci pourrait être fait, supposons comme le fit Clerk Maxwell que nous ayons un récipient d'air séparé en deux parties par une paroi percée d'un trou minuscule fermé par une porte coulissante que manœuvre un microbe très intelligent. Quand celui-ci voit une molécule rapide venant de la gauche à la droite, il ouvre la porte. En voyant venir de la droite à la gauche une molécule lente, il la fait passer de même. Bientôt, il aura toutes ses molécules actives d'un côté et les molécules lentes de l'autre. Il se produira, bien en-

tendu, une redistribution d'énergie parmi les molécules de chaque compartiment, mais, dans l'ensemble, l'énergie dans le compartiment où ont été seules admises les particules rapides sera beaucoup plus grande que l'énergie dans l'autre compartiment. La température sera donc beaucoup plus élevée dans l'un que dans l'autre. Le microbe peut avoir opéré sans travail, car sa porte peut être supposée aussi légère et aussi bien graissée que l'on veut. Par suite, d'un corps à une certaine température, nous avons, sans dépenser de travail, obtenu des corps à deux températures différentes à l'aide desquels nous pouvons faire marcher une petite machine. Or, d'après la seconde loi de la thermodynamique, il nous est impossible d'obtenir du travail d'un corps primitivement à une seule température. Quelle en est l'explication ?

L'explication est simplement que les lois de la thermodynamique ne s'appliquent qu'aux morceaux de matière visibles et qu'elles supposent que nous ne pouvons pas employer des microbes et jouer avec les molécules. Si nous pouvions apprivoiser les molécules, si nous pouvions, sans faire de travail, modifier la norme de la nature, nous pourrions violer la loi. Si le restaurateur, dont il a été question plus haut, pouvait aller trouver chaque homme et lui parler, il est certain qu'il pourrait influencer la demande d'aliments, de la manière qui lui conviendrait le mieux. Cependant, dans les conditions normales, il lui faut prévoir son ravitaillement de façon à convenir à la demande ordinaire d'une foule. Nos lois ordinaires de la physique, de la mécanique et de la chimie sont des lois qui se rapportent à des foules de molécules.

Quand nous avons à traiter des questions en fonction des molécules, il nous faut introduire la probabilité au lieu de la certitude. Supposons que nous suspendions une pièce de monnaie en l'air. Les millions de millions de millions de molécules se déplacent autour d'elle de façon désordonnée — certaines rapidement, d'autres lentement, celles-ci vers le haut, celles-là vers le bas. Dans l'ensemble, les coups dans les diverses directions se neutralisent et la pièce de monnaie reste immobile. Supposons, cependant, qu'à un moment donné il se produise une différence de force ou une différence dans le nombre de coups de molécules sur un côté, par exemple sous la pièce de monnaie. Que s'ensuivra-t-il ? La pièce de monnaie sautera. Est-il impossible qu'il y ait une pression sensiblement plus forte produite par le bombardement moléculaire dans une direction particulière plutôt que dans une autre ? Est-il impossible qu'une pièce de monnaie lancée en l'air tombe « face » six mille fois ou plus sur dix mille coups ? La réponse dans les deux cas est : « Non, cela n'est pas impossible, mais c'est extrêmement improbable. » En réalité, dans le dernier cas considéré, il faut un nombre suivi de quatre-vingt sept zéros pour exprimer l'improbabilité : ce qui veut dire que l'on est extrêmement loin d'avoir même une chance sur un million de millions. Pratiquement, nous pouvons aussi bien dire que la chose *est* impossible, mais philosophiquement, il y a une différence. La thermodynamique dit tout simplement : « impossible », en pareil cas.

Notre exemple du jeu de pile ou face nous entraîne encore un peu plus loin. Supposons que nous lancions seulement cent fois en l'air notre pièce de monnaie :

est-il tellement improbable qu'il y ait soixante « face » ou plus ? Non, il y a seulement trente-trois chances adverses contre une. Et supposons que nous ne lancions notre pièce que dix fois : la chance de six « face » ou plus est très grande, deux chances adverses contre une seulement. De même supposons que nous prenions une très petite particule, n'ayant, par exemple, que mille fois le diamètre d'une molécule simple, suspendue dans un liquide ou un gaz ; nous pouvons calculer quelle est la chance pour que la force des coups moléculaires reçus sur un côté puisse dépasser la force des coups reçus sur l'autre côté suffisamment pour produire un mouvement perceptible. Le résultat est qu'avec une particule de cette dimension, qui peut être vue à l'aide d'un microscope puissant, nous pourrions nous attendre à un petit mouvement irrégulier, suffisamment important pour être perçu au microscope, sous l'effet de l'agitation des molécules qui l'entourent. Plus petite est la particule, plus sensible sera l'agitation à prévoir. Par contre, la chance d'un déplacement apparent de toute particule visible à l'œil nu, dans un liquide protégé contre les remous, est si faible qu'il est absolument inutile d'essayer de l'observer.

Il semble donc que si notre conception de la chaleur en tant qu'énergie moléculaire était exacte, nous pourrions avoir pour ainsi dire, une image au ralenti de cette agitation dans le mouvement irrégulier des grains microscopiques contenus dans un liquide. En fait, ce mouvement avait été découvert bien longtemps avant que l'on ait compris sa signification théorique. Il y a cent ans environ, le botaniste anglais Brown observait que les particules minuscules dans

certains sucres de plantes étaient en état perpétuel de tremblement, se déplaçant de-ci de-là dans des directions totalement différentes les unes des autres. Progressivement, à la suite d'expériences répétées, vers la fin du dix-neuvième siècle, les diverses explications superficielles du mouvement — qu'on disait dû à l'ébranlement de l'édifice, à des courants causés par la lumière d'éclairage..., etc. — furent écartées de façon définitive. Finalement, le Professeur Perrin entreprit des mesures systématiques, considérant les grains comme d'énormes molécules bousculées par les molécules ordinaires de liquide — Gullivers qui avaient envahi le liquide Lilliput et subissaient la volonté de la multitude. D'après ces mesures, faites sur une très petite goutte d'eau décolorée avec la peinture à la gomme-gutte, qui se décompose en sphères minuscules de substance calleuse une fois agitée dans le liquide, il put non seulement vérifier que le mouvement des particules est parfaitement expliqué par le mouvement dû à la chaleur, mais aussi déduire le nombre de molécules dans un poids donné de substance. Le nombre de molécules dans un litre d'eau est à peu près de trente millions de millions de millions de millions, ce qui veut dire que si chaque habitant du globe — femme ou enfant — se mettait à les compter rapidement (cinq par seconde, par exemple), nuit et jour, il faudrait plusieurs millions d'années pour achever le travail. Ce chiffre a été confirmé par un grand nombre d'expériences basées sur des principes tout à fait différents.

Par suite, dans un liquide, les particules microscopiques peuvent être projetées vers le haut par l'agitation moléculaire. Si un microbe construisait sa

maison, il pourrait attendre que les briques minuscules lui soient lancées en l'air : l'énergie nécessaire serait prise à l'énergie moléculaire du liquide, qui est de la chaleur, de sorte qu'au moment où la maison du microbe serait construite, le liquide se serait un peu refroidi, en compensation de l'énergie nécessaire pour monter les briques. Le microbe aurait apparemment violé la seconde loi de la thermodynamique, mais cela ne nous gêne guère, car la seconde loi ne régit que la façon dont se comporte la matière en bloc, et ne s'applique pas, si nous pouvons employer des créatures assez petites pour établir une discrimination dans le mécanisme moléculaire. Plus grosses sont les particules, moins probable est le mouvement perceptible dû à l'agitation moléculaire : dans le cas d'une brique visible, il nous faudrait peut-être attendre des millions de siècles pour la voir sauter, mais nous ne pouvons pas affirmer que le saut est absolument impossible.

Cette façon statistique de considérer les problèmes physiques, cette conception que ce que nous voyons n'est qu'un effet moyen et qu'il faut être très prudent avant d'attribuer à des molécules individuelles des propriétés et des lois qui ont été découvertes de l'observation de la nature en bloc, jouent un grand rôle dans la physique moderne. La conservation de l'énergie elle-même est une loi qui concorde avec toutes nos observations ordinaires, mais récemment on a suggéré qu'elle peut ne pas s'appliquer aux événements qui se passent à l'intérieur de l'atome. La question est discutable, mais elle montre la prudence, le scepticisme — on pourrait presque dire la timidité — qui ont trouvé place dans la pensée scien-

tifique à la suite des nombreux phénomènes étonnants qui sont venus à notre connaissance au cours des dix dernières années. Il fut un temps où l'on attribuait une valeur universelle à toute loi vérifiée par de nombreuses expériences ; aujourd'hui, on a bien soin d'établir une différence entre les faits d'observation et les méthodes spéculatives introduites pour les expliquer. Au début du siècle, il s'était créé un mouvement contre la théorie atomique, car à cette époque il n'y avait aucune preuve *directe* convaincante de l'existence des atomes et de l'agitation atomique ; mais les expériences sur le mouvement brownien et, depuis lors, un grand nombre d'autres expériences fondamentales ont maintenant établi l'existence objective des atomes, si tant est que l'existence objective de quoi que ce soit puisse être démontrée.

Ce que nous avons dit jusqu'à présent de la chaleur et du mouvement atomique s'applique très bien aux conditions ordinaires, c'est-à-dire en particulier aux températures ordinaires. Aux températures extrêmement élevées ou extrêmement basses, cependant, nous nous trouvons en face de phénomènes nouveaux des plus intéressants. Au cours des trente dernières années, une technique permettant d'atteindre des températures excessivement basses a été imaginée, surtout par le Professeur Kamerlingh Onnes à Leyde (en Hollande), technique qui nous a permis de descendre à moins d'un degré au-dessus du zéro de température absolue. Ce zéro absolu est une conception très importante : il représente une température au-dessous de laquelle il semble impossible de descendre. La discussion complète de cette question nous entraînerait au problème de la définition d'une échelle de tempé-

ratures, ce qui n'est pas si simple que cela paraît, surtout aux basses températures. Il est vain, par exemple, de dire que des dilatations égales du mercure dans le thermomètre représentent des élévations égales de température, car si nous mettions une autre substance dans notre thermomètre, nous obtiendrions une graduation légèrement différente, et il ne semble pas qu'il y ait lieu de donner la préférence au mercure. De toute façon, le mercure gèle à 40 degrés C. au-dessous de zéro et ne peut donc être utilisé pour donner une graduation à ces basses températures. Des raisons théoriques indiquent qu'un gaz idéal, sans cette moindre trace de l'état liquide que les gaz réels présentent, serait la substance idéale pour la mesure des températures. Malheureusement, il n'existe pas de gaz idéal, mais nous pouvons calculer dans quelle mesure un tel gaz s'écarte d'un gaz réel, de même que nous pouvons mesurer de combien tout solide réel diffère de la rigidité parfaite. On vérifie alors que l'échelle de température d'un gaz parfait concorde assez bien avec celle du thermomètre à mercure, à divisions égales, sur l'intervalle de températures sur lequel le mercure peut être utilisé. Or, ce gaz idéal à un certain degré de froid se réduirait à un volume nul, et ce degré de froid représente le zéro absolu, au-dessous dequel nous ne voyons aucun moyen de descendre : il nous est impossible d'imaginer une substance de volume moindre que le volume nul. Le zéro absolu ainsi indiqué est 273 degrés C. au-dessous de la température de la glace fondante ; le point d'ébullition de l'eau est, bien entendu, à 100 degrés C au-dessus de la température de la glace fondante.

Aux températures extrêmement basses atteintes au

laboratoire de Kamerlingh Onnes, tout gaz connu devient d'abord liquide, puis solide ; le gaz qui a résisté le dernier est l'hélium qui a été solidifié en 1927 à une température de un degré seulement au-dessus du zéro absolu. Nous pouvons obtenir de nouvelles indications concernant l'énergie des molécules d'une substance en mesurant la chaleur spécifique qui est la chaleur qu'il faut ajouter pour élever la température de la substance d'un degré. Un résultat étonnant obtenu est que, à ces basses températures, la chaleur spécifique est à peu près nulle ; par exemple, il ne faut, pour élever la température d'une livre d'aluminium de 30 degrés au-dessus du zéro absolu à 31 degrés au-dessus du zéro absolu, que le vingt-cinquième de la chaleur qu'il faut pour l'élever de un degré aux températures ordinaires. Ces très faibles chaleurs spécifiques aux basses températures ont une très grande importance pour la théorie des quanta comme nous le verrons chapitre VI.

A ces températures exceptionnellement basses, plusieurs métaux perdent pratiquement toute résistance au courant électrique : ils deviennent superconducteurs de l'électricité. Le terme « super » souvent employé par les magnats du cinéma sans grande raison, est réellement justifié dans ce cas, comme on peut le juger par le fait que six cents kilomètres de fil de plomb à cinq degrés au-dessus du zéro absolu n'offrent pas plus de résistance au passage de l'électricité qu'un centimètre de fil de cuivre du même diamètre aux températures ordinaires. Les recherches de ce genre sont parmi les plus intéressantes pour le physicien car il reste à trouver une théorie satisfaisante. Toutes les propriétés de la matière à ces tempé-

ratures extrêmement basses sont des plus passionnantes et des plus curieuses.

A l'autre extrémité de l'échelle, nous pourrions supposer que les molécules se déplacent de plus en plus vite au fur et à mesure que la température croît, et autrefois on s'imaginait qu'il en était ainsi : les propriétés des gaz aux températures plus élevées étaient considérées comme un prolongement naturel de celles aux températures plus basses. Mais nous savons maintenant qu'il est incorrect de considérer les molécules comme de petites billes dont la vitesse peut être indéfiniment accrue en élevant la température. Quand la température s'élève au-dessus d'un certain point, les molécules commencent à se casser en morceaux, c'est-à-dire à se dissocier en atomes composants, de même qu'un groupe de billes collées ensemble se dissocierait en ses billes composantes si on le frappait violemment. Si la température est encore élevée davantage, les atomes eux-mêmes commencent à se dissocier et perdent leurs électrons groupe par groupe, jusqu'à ce qu'il ne reste plus que les noyaux atomiques et les électrons non connectés ¹. Les températures supprimant quelques électrons aux atomes peuvent être obtenues sur terre, mais les températures pour lesquelles les électrons sont dépouillés du noyau de même que la graine est enlevée lorsqu'on souffle sur une fleur de pissenlit, ne laissant que le calice central, ne peuvent être obtenues que dans les étoiles chaudes. Cette conception des atomes brisés en morceaux quand les chocs des atomes entre eux sont

¹ La théorie moderne de la structure de l'atome est discutée chapitre VII.

suffisamment vigoureux, s'est révélée de la plus grande importance en astronomie, car à l'intérieur des étoiles la température semble être voisine de 40 millions de degrés C., alors que les températures terrestres les plus élevées ne dépassent pas quelques milliers de degrés. Une fois de plus, l'application de lois obtenues dans un groupe de circonstances, à des circonstances tout à fait différentes, donnerait naissance à de graves difficultés. Nous sommes ramenés, que nous le voulions ou non, aux réalités de la structure atomique. Les anciennes lois de la chaleur, qui ne tenaient compte que de la façon dont se comporte en bloc la matière, ne suffisent pas à expliquer les problèmes du rayonnement calorifique aux très hautes températures, ni ceux des vibrations calorifiques aux très basses températures. Il nous faut reporter à plus tard ce que nous avons à dire sur cette question.

CHAPITRE III

Au sujet du Son et des Vibrations

Il n'existe aucune branche de la physique dans laquelle on ne soit tôt ou tard — généralement tôt — amené à l'étude des vibrations, l'étude des ondes, l'étude de mouvements qui se répètent indéfiniment comme celui du pendule. C'est ce que le physicien appelle des phénomènes périodiques. Tous possèdent certaines caractéristiques fondamentales dont la plus évidente est la période de temps, c'est-à-dire la durée que met un cycle à s'accomplir. Un pendule met tant de temps à exécuter un battement complet, puis repart pour un autre battement ; un volant met tant de temps à effectuer un tour complet, et alors chaque endroit de volant se retrouve exactement à la même position qu'il occupait au début du tour ; une corde de violon donnant une note déterminée ne prend qu'une fraction de seconde pour achever une oscillation complète en avant et en arrière ; une onde radioélectrique, qui est une oscillation de force électrique et magnétique, se répète elle-même en un endroit donné et les intervalles entre les points de répétition sont égaux. Toutes les vibrations, oscillations et ondes, possèdent alors une période de temps caractéristique. En d'autres termes, elles possè-

dent une fréquence caractéristique, la fréquence étant le nombre de vibrations complètes par unité de temps, une seconde par exemple. Bien entendu, si nous connaissons la période, nous pouvons trouver la fréquence et vice-versa : si la période est $1/10^{\circ}$ de seconde, la fréquence est de 10 vibrations par seconde. Nous pouvons employer l'une ou l'autre définition au choix. Dans le cas d'alternances très rapides, telles que celles d'une vibration sonore, et encore plus celles d'une onde radioélectrique, il est plus usuel de parler de la fréquence, car il est plus commode, par exemple, de dire une fréquence de 256 vibrations par seconde qu'une période de $1/250^{\circ}$ de seconde.

L'étude du son est réellement l'étude des vibrations des corps matériels. Les vibrations de la lumière nous arrivent du soleil à travers l'espace vide de matière, de telle sorte que, quelle que soit la nature de la lumière, il ne s'agit pas d'oscillations de substance matérielle au sens ordinaire. Le son, par contre, nécessite un solide, un liquide ou un gaz pour se propager : un habitant de la lune pourrait voir un signal lumineux émis par la terre, mais il n'entendrait aucun son si fort qu'il soit. Les solides propagent le son fort bien, et c'est là un fait bien connu des héros des vieilles histoires d'aventures qui collaient leurs oreilles au sol pour entendre le bruit des chevaux qui approchaient. Une expérience très instructive sur la propagation du son à travers une tige de bois d'une dizaine de mètres de longueur fut faite par Tyndall à la Royal Institution.

Au rez-de-chaussée, un homme jouait du piano. Une tige de bois reposant sur la table d'harmonie du piano passait à travers des trous des planchers et

remontait jusqu'au second étage dans la salle des conférences. Quand un plateau en bois était placé sur le haut de la tige, le son du piano devenait nettement audible dans la salle. Les vibrations sonores en passant le long de la tige faisaient vibrer le plateau et les vibrations du plateau se communiquaient à l'air. L'expérience pouvait être rendue encore plus concluante en plaçant un violon et une harpe à l'extrémité supérieure de la tige de bois, de façon à servir de table d'harmonie. Dans le cas des liquides, les baigneurs peuvent vérifier aisément que l'eau propage également bien le son, car le battement de l'hélice d'un navire peut être détecté en mettant la tête sous l'eau, même si le navire est loin. Des méthodes de repérage des sous-marins par le son ont été imaginées pendant la guerre ; les bruits des machines étaient propagés par l'eau et reçus dans des microphones appropriés. En ce qui concerne les gaz, le son arrive ordinairement à nos oreilles par l'air, et il existe des expériences simples montrant que le son passe tout aussi bien dans les autres gaz. Par contre, on montre aisément que le son ne passe pas dans le vide : il suffit de refaire l'expérience ancienne de la sonnette actionnée électriquement ou par mouvement d'horlogerie, et soigneusement suspendue par de minces fils de caoutchouc dans un récipient dont on peut vider l'air : au fur et à mesure que l'air s'en va, le bruit de la sonnette devient de plus en plus indistinct et finalement on n'entend plus rien. Bien entendu, si la sonnette est placée sur le fond du récipient, au lieu d'être suspendue par des fils minces qui conduisent mal le son, le bruit de la sonnerie se

transmet à la table à travers le support et se communique à l'air dans la salle.

L'étude du son comporte trois divisions séparées : l'étude des corps sonores, c'est-à-dire des vibrations ; le passage du son de la source à l'endroit où il est détecté, qui constitue l'étude des ondes ; enfin, la façon dont agit l'oreille, qui fait partie de l'étude générale des organes sensoriels. La perception du son par l'oreille implique, bien entendu, des considérations physiques, mais elle est généralement considérée comme une affaire de physiologie, et sera par conséquent négligée ici. En ce qui concerne l'origine du son, il nous est possible d'observer directement la façon dont se produisent les vibrations, ce que nous ne pouvons pas faire dans le cas de la lumière. Il est vrai que la fréquence de vibration d'un corps donnant une note musicale est si élevée, c'est-à-dire 256 par seconde dans le cas de l' Ut_2 , que le mouvement ne peut pas être observé par l'œil seul. Une corde de violon ou un diapason en état de vibration apparaissent indistincts, mais il existe beaucoup de procédés permettant d'analyser le mode de vibration.

La hauteur de la note est fixée uniquement par le nombre de vibrations par seconde, ainsi que l' Ut_2 soit donné par un tuyau d'orgue, un violon ou un piano, il se produit par seconde 256 cycles complets de vibrations de la colonne d'air enfermée dans le tuyau, ou de la corde de violon ou de piano. Il est possible de cette façon de déterminer le nombre de battements d'aile par seconde d'une abeille, d'une guêpe ou d'un moustique simplement en accordant une corde sur la note du bourdonnement de l'insecte, et en déterminant ensuite le nombre de vibrations par

seconde de la note de la corde, soit par le calcul d'après la dimension de la corde et de sa tension, soit par toute autre méthode. Bien entendu, si l'expérimentateur a suffisamment d'oreille pour classer de façon précise la position de la note de l'insecte dans l'échelle musicale, le problème est immédiatement résolu, puisque la fréquence de chaque note est connue : ainsi, si une abeille donne le sol_1 , ses ailes doivent battre 192 fois par seconde, tandis qu'une mouche ordinaire donnant le fa_2 fait environ 340 mouvements d'aile par seconde.

La puissance de la note est donnée par la force de la vibration ; plus l'écart de la corde vibrante est grand par rapport à sa position d'équilibre, plus intense est le son. Le caractère de la note, le timbre, est donné par le caractère de la vibration. Le timbre est la qualité par laquelle la note d'une trompette, par exemple, diffère de la note d'un piano, bien que tous les deux puissent donner l' ut_2 avec une égale intensité. Si le corps sonore se déplace à une vitesse uniforme jusqu'à sa position extrême, puis revient avec vitesse uniforme à l'autre position extrême, nous avons un timbre différent de celui qui est obtenu si le corps se déplace comme un pendule, c'est-à-dire plus vite en passant à la position initiale de repos et plus lentement à l'extrémité du balancement. Les particularités des vibrations d'un corps mobile sont reproduites dans la forme de l'onde sonore qu'il engendre, car toute perturbation que la corde vibrante reproduit dans l'air se propage avec la vitesse du son aussi vite qu'elle est produite. La même chose est vraie de la lumière ou des ondes radioélectriques : toute particularité de la vibration qui donne naissance à l'onde se

reproduit sous forme d'une particularité dans la forme de l'onde elle-même, mais avec la lumière, il n'est pas possible d'examiner le corps vibrant, l'atome lui-même, et il faut tirer nos conclusions de la forme des ondes émises.

La plupart des gens s'étonnent que le mouvement d'un simple petit diaphragme, tel que le disque en mica dans la boîte sonore d'un bon phonographe puisse reproduire le son compliqué d'un orchestre avec instruments à cordes, instruments à vent, cuivres et tambours jouant tous ensemble au même instant. Le son d'un seul instrument est assez compliqué car, outre la vibration fondamentale qui donne la hauteur de la note, il y a dans les instruments à cordes plusieurs harmoniques, l'octave, le cinquième au-dessus de l'octave, la double octave, etc., qu'une oreille exercée peut détecter. Comme les fréquences de ces harmoniques sont deux, trois, quatre... fois plus grandes que la fréquence de la note fondamentale, la période de la fondamentale comprend un nombre entier de vibrations des harmoniques : un cycle complet est encore inclus dans la période de la note elle-même et le seul effet des harmoniques est de modifier la forme de la vibration, c'est-à-dire de modifier, par exemple, l'instant de la période où la vibration a la moitié de sa plus grande valeur. L'oreille possède le pouvoir remarquable d'analyser la forme d'onde compliquée en ses plus simples parties, et de recueillir les divers harmoniques qui résonnent simultanément. Il est intéressant de faire remarquer que l'œil ne possède pas ce pouvoir d'analyse : une lumière blanche, par exemple, peut être produite en mélangeant toutes les couleurs en pro-

portions appropriées, en ne mélangeant que deux couleurs en proportions appropriées, ou en mélangeant trois ou plusieurs couleurs. Le blanc final peut paraître le même à l'œil, quelle que soit la façon dont il est produit ; l'œil ne peut, sans l'aide d'instruments, détecter les couleurs pures qui ont été combinées pour produire toute couleur particulière.

Une corde que l'on pince donne donc une onde de forme caractéristique. De même, plusieurs instruments résonnant simultanément produisent une onde de forme encore plus compliquée, mais, naturellement, quel que soit le nombre de sons différents partant ensemble, le résultat en un endroit donné ne peut être qu'un seul mouvement. Un morceau de l'atmosphère ne peut être en plus d'un endroit à la fois : cet endroit, à un instant donné, est déterminé par l'effet combiné de tous les sons qui y passent. Pour en donner un exemple, nous dirons que si compliquées que soient les transactions dans un magasin, quel que soit le chiffre des ventes et des achats, si la balance totale est faite à un moment donné, il ne peut y avoir qu'une seule somme déterminée comme résultat, bien qu'il faille une analyse soigneuse pour arriver à cette somme. Le résultat de l'orchestre est donc de lancer dans l'air une onde de forme très compliquée qui est ensuite analysée par l'oreille ; plus l'auditeur est entraîné, toutes choses égales d'ailleurs, plus complète est l'analyse. Quand un enregistrement phonographique est fait, le diaphragme portant l'aiguille qui taille les indentations est actionné par l'onde compliquée de façon à enregistrer le mouvement résultant produit par tous les instruments. De même, quand le disque est joué, les

indentations font vibrer le diaphragme de la boîte sonore de la même façon compliquée, et une onde résultante est émise ayant exactement la même forme que l'onde primitivement produite par l'orchestre. Le résultat sur l'oreille est donc le même.

Il est intéressant de considérer un instant la nature d'une onde. La vague qui se brise sur le rivage constitue malheureusement un très mauvais exemple de l'onde physique ; par contre, les ondulations produites dans une mare par une pierre ou les longues houles de la pleine mer offrent d'excellents exemples. La caractéristique est que, en tout endroit donné, un mouvement périodique ou pendulaire se produit sans qu'il y ait déplacement en avant du milieu — air ou eau — à travers lequel l'onde se propage. Les enfants dont le petit canot à voiles est arrêté au milieu d'un bassin, ont l'habitude de jeter des pierres derrière lui pour essayer de le faire revenir : mais le résultat est nul, le canot monte et descend sous l'effet des ondulations, mais ne se déplace pas en avant, ce qui n'empêche pas les enfants de recommencer. Un bouchon dans le bassin monte et descend lorsque l'ondulation l'atteint, mais il ne se déplace pas en avant avec la crête de l'onde. Ce qui se propage est la forme d'onde.

Un bon exemple de ce que nous désignons par le mot onde est donné par une longue ligne de soldats s'alignant sur la droite. Si le soldat à l'extrême droite fait un petit mouvement en avant, tous les autres soldats s'alignant sur le voisin font successivement un petit mouvement en avant et une ondulation en résulte le long de la ligne de droite à gauche, sans que chaque soldat considéré individuellement se soit déplacé de droite à gauche. Si le soldat de l'extrême

droite faisait un petit mouvement en avant et en arrière à des intervalles très réguliers, par exemple toutes les deux secondes, nous aurions un excellent exemple d'une onde de fréquence trente par minute. Chaque homme ferait pareillement un mouvement en avant et en arrière trente fois par minute, mais chaque homme serait un peu en retard sur son voisin de droite. Si les hommes étaient arrêtés subitement, la ligne serait sinueuse ; la distance minimum entre deux hommes dans la même position et au même état de leur mouvement serait appelée la longueur d'onde. Quand la ligne est en mouvement, un homme se trouve à la position extrême avant, et au moment suivant c'est son voisin de gauche. La position de l'homme qui se trouve dans ce cas, se déplace le long de la ligne, ce qui correspond à l'avance de la crête de l'onde.

Dans le cas de la rangée de soldats, le déplacement de tout homme est à angle droit avec la direction dans laquelle l'onde se déplace. Une telle onde est appelée onde transversale. Une onde radioélectrique ou une onde lumineuse appartiennent à ce type d'ondes : il existe une force électrique et une force magnétique accompagnante perpendiculaires à la direction de l'onde, et l'intensité de ces forces varie périodiquement pendant le temps que passe l'onde. Si nous pouvions suspendre une charge électrique inconcevablement petite et la surveiller, et si une onde radioélectrique ¹ passait à travers notre maison en venant du Nord, la charge électrique monterait et descendrait

¹ Ce que nous disons là suppose que l'onde est polarisée, mais c'est là une simplification qui ne change rien.

verticalement sous l'influence de la force électrique périodique, tout comme le bouchon sur l'ondulation dans l'eau. En même temps, un pôle magnétique inconcevablement petit se déplacerait en arrière et en avant, horizontalement, de l'Est à l'Ouest et ainsi de suite.

Une onde sonore dans l'air, par contre, n'est pas une onde transversale. Reprenons la comparaison de notre ligne de soldats, mais cette fois à la file et supposons que chacun place ses mains sur les épaules de l'homme en avant de lui. Si quelqu'un donne à l'homme de queue une violente poussée, celle-ci se transmettra d'homme en homme jusqu'à l'avant. Une compression, c'est-à-dire un endroit où les hommes seront plus rapprochés qu'ils ne devraient l'être, se propagera le long de la ligne. Si, maintenant, l'homme de queue est ramené en arrière, il entraînera successivement les autres en arrière : un vide, c'est-à-dire un espace où les hommes seront plus éloignés qu'ils ne devraient l'être se propagera le long de la ligne. Enfin, si l'homme de queue est poussé en avant et ramené en arrière, une série de compressions suivies de vides se propagera sans arrêt le long de la ligne. C'est là le cas de l'onde sonore dans l'air, les régions de pression et les régions de vide se déplaçant en avant avec ce que nous appelons la vitesse du son. Le déplacement réel d'une particule d'air se fait en arrière et en avant le long de la ligne sur laquelle l'onde voyage : il s'agit alors d'une onde longitudinale.

Nous ne pouvons avoir que des ondes longitudinales dans un liquide ou dans un gaz, car il n'existe pas de force pour ramener une particule en arrière et la faire

osciller si nous la tirons de côté, comme il s'en produit lorsque nous pinçons de côté une corde de violon. Nous pouvons obtenir des ondes transversales sur une corde, comme on peut le vérifier en secouant l'extrémité d'une longue corde, et nous pouvons avoir d'autres formes d'ondes dans une longue barre telles que des ondes de torsion. La forme de l'onde sonore dans l'air est fixée par la feuille d'instructions, si je puis m'exprimer ainsi, pour le mouvement en arrière et en avant de la particule individuelle. Si elle se déplace avec grâce de-ci de-là comme un pendule, nous avons la forme d'onde la plus simple ; mais elle peut aussi se déplacer par saccades avec de petites hésitations, des mouvements d'avances et de retraites, en plus du mouvement principal en avant, comme si chacun des hommes de notre file indienne avait un accès de fièvre en même temps qu'un doux balancement vers l'avant et vers l'arrière.

Si dans une onde, il n'y a aucun mouvement général en avant de toute particule, néanmoins l'« état de mouvement » se déplace en avant dans la direction de l'onde. Cela signifie que l'énergie se déplace en avant le long de l'onde. Si en plongeant et retirant alternativement la main dans l'eau, je peux faire monter et descendre un bouchon placé à six mètres, c'est évidemment que je lui communique de l'énergie qui se déplace avec l'ondulation ; l'eau qui est sous ma main n'atteint pas le bouchon, mais c'est l'état de mouvement qui se déplace. Dans toutes les ondes, donc, il existe un déplacement réel d'énergie dans la direction de la propagation de l'onde.

Les variations de pression et le déplacement en arrière et en avant de l'air dans une onde sonore sont

ordinairement très petites. Un son est distinctement audible même quand les plus grandes variations de pression de l'onde ne sont que de quelques cent-millionièmes de la pression atmosphérique, et alors que la plus grande amplitude du mouvement des particules n'est que de quelques cent-millionièmes de centimètre. De même, l'énergie d'une onde sonore ordinaire est faible. Mais si une onde sonore est envoyée à travers une substance qui oppose une forte résistance élastique à la compression, telle qu'un liquide ordinaire, et si, néanmoins, grâce à une forte pression le mouvement oscillatoire est important, il en résulte qu'une grande quantité d'énergie peut être mise dans l'onde, et se déplace avec elle sans perte appréciable. Sur ces bases, un système réel de transmission d'énergie par l'envoi d'ondes sonores dans des liquides enfermés dans des tuyaux a été imaginé par M. Constantinescu. A l'extrémité transmettrice, un petit piston qui, dans le cas d'un générateur particulier de 10 chevaux, a environ 4 centimètres de diamètre et 2 cm. 5 de course, reçoit un mouvement rapide d'allées et venues grâce au moteur dont il s'agit de transmettre la puissance. Dans le cas cité, la plus grande pression atteinte a été de 100 kilos par centimètre carré. L'énergie dans une onde sonore augmente très rapidement quand la fréquence croît, toutes choses égales d'ailleurs, car la vitesse avec laquelle les particules de matière oscillent est proportionnelle à la fréquence, et l'énergie dépend du carré de la vitesse. La fréquence est donc rendue aussi élevée que cela est possible — 40 coups par seconde avec le groupe de 10 chevaux en question, ce qui donne la note *mi* deux octaves au-dessous du *do* moyen. Les

ondes engendrées par le piston à grandes vitesse se déplacent le long d'un tuyau, de 72 mètres de longueur dans notre exemple, et à l'autre extrémité actionnent un moteur de n'importe quel type, en poussant et tirant un piston semblable à celui qui engendre l'onde, avec une énergie égale à celle mise dans les ondes à l'extrémité génératrice, sauf en ce qui concerne les faibles pertes par frottement. Il importe de se rendre compte que lorsque le piston se déplace à l'extrémité de départ, la masse entière de liquide ne se déplace pas pour pousser le piston à l'autre extrémité ; en fait, l'inertie du liquide entraîne la formation d'une région de haute compression sur le piston, qui se déplace à travers le liquide dans le tuyau et pousse le piston à l'autre bout. De même, quand le piston à l'extrémité de départ est retiré en arrière, il se crée une région de basse pression qui se déplace dans le liquide et tire en arrière le piston de l'autre extrémité. Il se produit un vrai déplacement d'onde, de note musicale, circulant à travers le liquide et fournissant de l'énergie, tout comme si deux équipes d'hommes étaient chargées, l'une d'apporter des bouteilles d'air comprimé, l'autre des récipients dans lesquels on a fait le vide, et que les hommes alternent de façon à ce qu'une bouteille d'air comprimé soit placée sur un moteur pour pousser le piston puis remplacée par un récipient dans lequel on fait le vide qui ramène le piston... et ainsi de suite. La méthode Constantinescu a été appliquée dans l'industrie des mines. Elle a été utilisée pour la première fois pendant la guerre quand l'inventeur l'employait pour synchroniser le tir des mitrailleuses avec les explosions du moteur d'un aéroplane, de façon que l'aviateur

puisse tirer à travers l'hélice. En connectant à la mitrailleuse, un tube plein de liquide transmettant les ondes engendrées par le moteur, le tir pouvait être réglé de façon à ce que les balles passent au bon moment à travers l'hélice.

La transmission par mouvement d'onde est plus commune qu'on ne le pense généralement. Par exemple, si une longue tige en acier est placée contre un rivet et frappée fortement avec un marteau à l'autre extrémité, une onde de compression se propage le long de la tige et vient frapper contre le rivet. Ce principe a été utilisé pour mesurer l'énergie de détonation d'une explosion, en utilisant une petite charge d'explosif pour fournir le choc, et en faisant l'onde projeter un petit morceau de métal à l'autre extrémité ; on mesurait alors la vitesse du petit morceau de métal. Même avec un marteau et un burin, le coup n'est pas transmis instantanément du marteau à l'objet sur lequel porte le burin. L'onde de compression met à peu près un vingt-millième de seconde pour passer d'une extrémité du burin à l'autre.

Une onde sonore, outre les mouvements rapidement alternants qu'elle crée, exerce une pression générale vers l'avant chaque fois qu'elle rencontre une surface : si elle est absorbée par la surface, la pression n'est que la moitié de ce qu'elle serait si elle était réfléchiée par la surface. En fait, cette pression est une propriété non seulement des ondes sonores, mais de toutes les sortes d'ondes, mais lorsque l'énergie de l'onde, de quelque énergie qu'elle soit, est faible, la pression est aussi très faible. Autrefois, on s'imaginait que les petits radiomètres visibles parfois dans les vitrines de bijoutiers ou d'opticiens, qui sont de petits systèmes d'ailettes

soigneusement montés sur pivot et qui tournent rapidement quand la lumière du soleil tombe dessus, devaient leur mouvement à la pression de la lumière ; en réalité, ce mouvement est dû à un effet calorifique associé avec les traces de gaz demeurant dans l'ampoule. Cependant, la pression de la lumière peut être démontrée expérimentalement en employant un mode de suspension des ailettes extrêmement soigné à la place du pivot précédent, et en vidant très soigneusement l'ampoule, mais il faut une très grande habileté pour mesurer cette pression de façon précise. La pression du son peut être également rendue visible à l'aide d'un disque soigneusement suspendu, mais le son doit être très fort pour produire des effets mesurables.

Nous avons souvent cité la lumière en parlant du son, car tous deux ont en commun certaines propriétés dues au fait que ce sont toutes deux des mouvements d'ondes, bien que les ondes sonores dans l'air soient longitudinales, tandis que les ondes lumineuses sont transversales. De même, des sources sonores qui sont des systèmes mécaniques vibrants, ont des analogies étroites dans d'autres branches de la physique, surtout dans les systèmes électriques oscillants avec lesquels la téléphonie sans fil nous a rendus familiers. Dans les systèmes de condensateurs, capacités, résistances et lampes à trois électrodes, les charges d'électricité oscillent avec certaines fréquences, certaines amplitudes et une certaine forme d'onde, et donnent naissance à des ondes électro-magnétiques qui se déplacent à travers l'espace ; il en est de même dans le cas du phonographe qui engendre des ondes sonores. La connexion entre les sources électriques et

mécaniques du son, l'oscillateur radiotéléphonique et la boîte sonore du gramophone, est encore plus étroite qu'on pourrait le supposer : l'inductance, la capacité, le courant et la charge dans le cas de l'oscillateur correspondent exactement à certaines caractéristiques du gramophone. Des formules semblables peuvent être appliquées dans les deux cas. C'est là non seulement un bon exemple de l'espèce de généralité qui se rencontre dans la physique mathématique, mais c'est aussi un cas d'importance pratique considérable. La grande amélioration apportée aux gramophones depuis 1915 n'est pas due seulement à l'application des appareils de téléphonie sans fil pour l'enregistrement de la musique, mais aussi aux connaissances acquises, au cours de ces dernières années, de la façon dont se comporte l'électricité oscillatoire dans les circuits compliqués, connaissances appliquées au problème des diaphragmes oscillants en mica ou en métal exposés à toutes les influences modificatrices qui existent dans le gramophone. La construction nouvelle de la boîte sonore et du pavillon fut faite à l'aide d'analogies mathématiques tirées de cas électriques qui ont été étudiés de façon minutieuse ces derniers temps. La nouvelle génération prend l'habitude de considérer les quantités électriques comme fondamentales et familières, et d'expliquer les quantités mécaniques — jusqu'alors les plus nouvelles — en fonction des premières. Autrefois, on construisait des modèles mécaniques avec des masses et des roues dentées pour expliquer la self-induction ; maintenant, la self-induction est une chose fondamentale qui n'a pas besoin d'explication et on s'en servirait plutôt pour expliquer le fonctionnement du modèle mécanique.

Il existe d'autres relations directes entre le son et la téléphonie sans fil. A l'aide de moyens ordinaires, tels que les diapasons, les sifflets ou les cordes, il est très difficile d'obtenir une note très élevée quelle que soit son intensité. Par les méthodes électriques, il est cependant possible de faire vibrer des morceaux assez épais d'un matériau rigide, le cristal de quartz ; à cause des forces puissantes qui tendent à ramener le morceau de quartz à son ancienne position quand il a été déformé, la note est extrêmement élevée. Le Professeur R. W. Wood a réussi de cette façon à produire des fréquences de 300.000 vibrations par seconde, et même occasionnellement des fréquences plus élevées ont été obtenues. Une telle « note » n'est pas audible, naturellement ; la plupart des gens, en effet, ne peuvent entendre les vibrations dépassant 17.000 par seconde, soit 6 octaves au-dessus du *do* moyen. Les ondes sonores à ces fréquences extrêmes, de centaines de milliers de vibrations par seconde, produisent des effets extraordinaires. Le déplacement réel des particules du liquide ou du solide à travers lesquels les ondes se déplacent n'est que de quelque cent-millième de centimètre ; néanmoins, à cause de la rapidité avec laquelle se fait le déplacement, l'énergie de l'onde est très grande, et certaines propriétés des mouvements d'ondes sont démontrées de façon exagérée. La pression du son, par exemple, qui nécessite un instrument très délicat pour la détection dans le cas des sons ordinaires, même lorsqu'ils sont insupportablement forts, se révèle de plusieurs façons frappantes dans le cas de ces ondes ultrasoniques comme on les appelle. Si la plaque de quartz oscillant qui engendre les ondes est placée à plat sur le fond

d'un récipient d'huile, de sorte que les ondes se déplacent vers le haut à travers le liquide, la surface de l'huile est soulevée suivant une boursouffure de 8 centimètres de hauteur par la pression du son et un jaillissement de gouttes d'huile surmonte la boursouffure. La pression sera telle qu'elle supportera une plaque chargée d'un poids de 200 grammes. L'énergie des ondes se révèle de diverses autres façons remarquables. Si une extrémité d'une tige de verre fin est plongée dans l'huile, et si l'autre extrémité est maintenue entre les doigts, un sillon se produira dans la peau sous l'effet du frottement entre la surface de la peau et la surface rapidement oscillante du verre. De même, si une tige conique est placée avec l'extrémité épaisse dans l'huile, l'extrémité pointue peut percer un trou dans un morceau de bois. Les effets biologiques des ondes, dont la longueur est mesurée en centièmes de centimètres (et non pas en mètres comme dans le cas des sons ordinaires), sont tout aussi étonnants. De petits poissons et des grenouilles sont tués si les ondes sonores sont envoyées à travers le liquide dans lequel ils sont plongés.

Nous voyons donc qu'il est possible de mettre beaucoup d'énergie dans les ondes sonores. Les propriétés des vibrations sont illustrées de façon frappante par les résultats obtenus. Nous sommes encore loin du jour où nous pourrions faire tomber les murailles à l'aide de trompettes comme on le fit à Jéricho, mais un pas dans cette voie a été fait.

CHAPITRE IV

Au sujet de la Lumière et des Radiations

Si un étroit faisceau de lumière blanche, de lumière solaire par exemple (mais la lumière d'une lampe électrique fera tout aussi bien) est envoyé par une fente sur un prisme, il se décompose en faisceaux étroits de façon à donner une longue bande lorsqu'il tombe sur un écran, à la place de la ligne lumineuse qu'il formerait s'il n'y avait pas de prisme interposé. La bande est colorée, les couleurs allant du rouge au violet en passant par l'orange, le jaune, le vert, le bleu et l'indigo. Les couleurs se fondent insensiblement l'une dans l'autre, de sorte qu'il est impossible de dire exactement où l'une s'arrête et où la suivante commence ; à chaque extrémité, elles s'estompent de sorte qu'il est difficile de dire exactement où finit la bande. Cette bande colorée est le spectre connu de lumière blanche découvert par Newton. Tout point particulier du spectre correspond à de la lumière qui a été déviée d'un certain angle de sa direction primitive. Or, si nous considérons un certain faisceau sortant du prisme, par exemple le centre du jaune, et si nous l'envoyons à travers un second prisme exactement semblable, il sera dévié exactement du même angle que par le premier prisme, et ainsi de

suite, quel que soit le nombre de prismes. La lumière blanche contient donc en elle-même une variété infinie d'espèces différentes de lumière, chacune d'entre elles étant caractérisée par l'angle dont elle est déviée par un prisme donné. Pour fixer la déviation, il nous faut spécifier le verre dont est fait le prisme, car des verres différents ont des pouvoirs de déviation différents ; il nous faut aussi indiquer l'angle du prisme, car un prisme de soixante degrés dévie davantage une espèce de lumière donnée qu'un prisme de trente degrés.

Bien que nous puissions, en vertu de notre sens des couleurs, distinguer des lumières déviées différemment à cause de leur couleur différente, il est évident que la valeur de la déviation est une façon plus précise d'indiquer l'espèce de lumière dont il s'agit. Ceci est dû à ce que des lumières dont les déviations ne diffèrent que d'une faible quantité donnent la même sensation de couleur à l'œil, et aussi à ce qu'il n'est pas toujours facile d'énoncer exactement la couleur d'une lumière donnée : un bleu verdâtre, par exemple, sera appelé bleu par les uns et vert par les autres. La déviation de la lumière dans son passage d'une substance à une autre, c'est-à-dire de l'air au verre, est appelée réfraction par les physiciens, et la propriété d'être déviée est appelée réfrangibilité, de sorte que nous pouvons résumer ce qui a été dit jusqu'à présent en disant que la lumière blanche contient la lumière de tous les degrés de réfrangibilité entre certaines limites, et qu'une certaine réfrangibilité peut être attribuée à toute lumière simple et pure — c'est-à-dire à toute lumière qui ne peut pas être décomposée en l'autres lumières par son passage à travers un prisme.

C'est là une des grandes découvertes de Sir Isaac Newton. Actuellement nous pouvons aller plus loin et dire, de façon plus générale, ce qui caractérise réellement une lumière monochromatique, ou la lumière d'une couleur ; par le mot couleur, nous voulons parler de la position exacte, dans le spectre, donnée par la réfrangibilité. Nous savons que la lumière a les propriétés d'un mouvement d'onde, et que des lumières de couleur différente se distinguent l'une de l'autre par des fréquences différentes de vibration, la fréquence du violet visible extrême étant près de deux fois celui du rouge visible extrême. Ce fait est quelquefois exprimé en disant que le spectre visible contient une octave de couleur, puisque dans le son une note qui a deux fois la fréquence d'une autre note est appelée l'octave au-dessus. Si donc nous voulons indiquer une lumière verte particulière, déviée d'un angle déterminé par un prisme donné et, par suite, occupant une place précise dans le spectre, nous pouvons spécifier sa fréquence, ce qui supprime la nécessité de parler de l'espèce de verre et de l'angle de prisme. La fréquence est le nombre caractéristique d'une lumière pure, de même qu'elle est le nombre caractéristique d'une note pure.

Dans l'espace vide, la lumière de toutes couleurs a la même vitesse, à savoir 300.000 kilomètres par seconde. Or, durant le temps d'une vibration complète, un mouvement d'onde doit avancer de la distance exacte d'une longueur d'onde, de sorte que si nous multiplions la longueur d'onde par la fréquence (le nombre de vibrations par seconde), nous obtenons la distance parcourue par l'onde en une seconde, c'est-à-dire la vitesse. Si l'on donne la fré-

quence, cela revient donc à donner la longueur d'onde dans le vide (qui est à peu près la même que la longueur d'onde dans l'air, puisque la présence de l'air ne retarde que peu la lumière). Cependant, dans les substances solides et liquides, le verre ou l'eau, par exemple, la lumière se déplace beaucoup plus lentement que dans l'espace ¹, et chaque couleur particulière se déplace avec une vitesse différente — en fait, c'est la différence de vitesse qui conduit à la différence de réfrangibilité. La longueur d'onde de la lumière est donc différente dans les différentes substances, mais la fréquence est partout la même. Avec la lumière visible, la fréquence est extrêmement élevée, et la longueur d'onde est faible en proportion. Pour une lumière jaune particulière produite quand du sel est mis dans une flamme à gaz incolore par exemple, la longueur d'onde dans l'air est 0,0000589 centimètre et la fréquence 509.100.000.000.000 vibrations par seconde. Puisque la vitesse des ondes radio-électriques est la même que celle de la lumière, nous pouvons calculer immédiatement la longueur d'onde si nous connaissons le nombre de kilocycles, c'est-à-dire le nombre de milliers de vibrations par seconde. Une fréquence ordinaire pour les ondes radioélectriques est 1.000 kilocycles, ce qui correspond à une longueur d'onde de 300 mètres ².

¹ La lumière a dans le verre ordinaire une vitesse égale à environ les deux tiers de la vitesse dans le vide, et dans l'eau une vitesse égale à environ les trois quarts de la vitesse dans le vide.

² 1.000 kilocycles = 1.000.000 vibrations par seconde et 300 mètres = 0,3 kilomètre ; $0,3 \times 1.000.000 = 300.000$ kilomètres par seconde, la vitesse de la lumière.

La nature périodique ou ondulatoire de la lumière nous est révélée par ce que l'on appelle l'interférence et la diffraction de la lumière. Nous expliquerons d'abord la question des interférences à l'aide des ondulations à la surface de l'eau. Supposons que nous ayons, suspendu au-dessus du milieu d'un étang calme, un ressort spiral portant à son extrémité inférieure une tige horizontale recourbée verticalement à chaque extrémité, de façon que les extrémités, séparées d'un mètre, par exemple, viennent presque toucher l'eau. Si l'on fait vibrer le ressort vers le haut et vers le bas, les deux extrémités de la tige viennent plonger et sortir ensemble de l'eau et donnent naissance à deux séries d'ondulations qui se propagent sous forme de cercles de diamètre croissant rapidement. Voyons maintenant ce qui va se passer lorsque les deux séries de rides vont se rencontrer. Si nous choisissons un point quelconque sur la surface de l'étang, l'eau sera soulevée et abaissée par chaque ride tout comme si l'autre ride n'existait pas, et pour trouver le mouvement résultant, il nous faut ajouter les mouvements dus aux deux rides séparées. Suivant la position du point choisi il peut arriver que les mouvements soient exactement concordants et que le mouvement résultant soit juste le double de chaque mouvement individuel ; il se peut aussi que les mouvements soient exactement opposés, de sorte que la crête d'un système d'ondulations se produise toujours au moment d'un creux de l'autre. Dans ce dernier cas, les deux mouvements s'annulent, et en ce point particulier l'eau ne se déplacera ni en haut ni en bas mais sera toujours au repos. Nous dirons qu'il y a *interférences*. Si le point choisi est à la même distance de chaque

centre, les ondes seront en concordance en ce point, et par suite nous aurons un mouvement résultant maximum le long de la ligne qui passe juste entre les deux centres et est perpendiculaire à la ligne qui les joint. Par contre, si le point choisi est plus éloigné d'un centre que de l'autre, exactement d'une longueur d'onde, les crêtes arriveront ensemble à ce point, et malgré qu'un système soit en retard d'une onde sur l'autre, il n'y aura aucun changement dans le résultat. Il se produira donc une série de lignes (en réalité les lignes seront légèrement courbes) sur la surface de l'étang, où le mouvement sera maximum. A mi-chemin entre ces lignes, c'est-à-dire aux points pour lesquels un système de rides est exactement en retard d'une demi-longueur d'onde sur l'autre, il y aura des lignes où aucun mouvement ne se montrera. Ainsi, la surface de l'étang sera zébrée de bandes de mouvement maximum et de bandes de mouvement nul ou à peu près nul. Aucune énergie n'est, bien entendu, détruite par l'interférence des deux systèmes d'ondes, mais elle est enlevée de certains endroits et accumulée dans d'autres. Si, en face des deux centres, nous immergeons à moitié une planche verticale dans l'étang, nous verrons qu'en certains points de la planche l'eau monte et descend, tandis qu'en d'autres l'eau ne bouge pas. Si nous sortons la planche de l'eau, nous constatons la présence d'une ligne sinueuse représentant la partie mouillée. En mesurant sur la planche la distance entre les endroits où l'eau était immobile, et en connaissant la distance de la planche aux centres et l'écartement des centres, il nous est facile de calculer la longueur d'onde des ondulations.

Nous avons exposé en détail le cas des rides à la surface de l'eau car l'interférence des ondes dont il sert d'exemple est d'importance capitale pour l'étude des vibrations. Il est très facile d'obtenir l'interférence des ondes sonores : si nous frappons un diapason et que nous le portions à l'oreille, nous trouverons en le faisant tourner verticalement qu'il y a certaines positions dans lesquelles on n'entend aucun son, tandis que dans les positions intermédiaires le son est fort, bien que la distance du diapason à l'oreille soit la même tout le temps. Ceci signifie que pour certaines positions du diapason, les distances sont telles que les ondes sonores des deux branches interfèrent sur l'oreille. En glissant un tube en carton sur une des branches, c'est-à-dire en supprimant l'effet de cette branche, le son reprendra son intensité, et nous constatons ce paradoxe que nous augmentons le son, en un point particulier, en en supprimant une portion.

Considérons maintenant l'objet réel de notre étude, à savoir l'interférence de la lumière. La seule difficulté consiste à trouver deux sources lumineuses dont les vibrations soient en concordance, car cette condition est indispensable. Dans le cas de l'étang, nous obtenions ce synchronisme en produisant les rides à l'aide d'un même ressort. Dans le cas du diapason, le synchronisme s'obtient de lui-même. Si nous plaçons deux fentes en avant d'une flamme, les faisceaux venant des deux fentes proviendront de parties différentes de la flamme, c'est-à-dire qu'il n'y aura pas synchronisme, donc pas d'interférences. Nous pouvons, cependant, utiliser la réflexion qui nous donne une image exacte de toute lumière : la lumière

et son image dans le miroir nous fournissent donc deux sources lumineuses dans lesquelles les vibrations de chaque petite partie de l'une sont exactement en synchronisme avec les vibrations de la partie correspondante de l'autre. Ou bien, par réflexion de deux miroirs, nous pouvons obtenir deux images de la même lumière, ces deux images devant être exactement semblables l'une à l'autre dans les moindres détails. Nous voyons donc maintenant comment obtenir deux ondes lumineuses se propageant dans toutes les directions à partir de deux sources différentes, de façon qu'aux points initiaux — c'est-à-dire à leurs sources — elles soient exactement en synchronisme (ou « en phase »). Aussi nous sommes à même d'examiner les cas simples d'interférence de la lumière qui se présentent à nous tous les jours.

Une mince pellicule, d'huile sur de l'eau par exemple, a deux surfaces, et la lumière émise par un point brillant, par exemple un point particulier du ciel ou d'un nuage brillant, doit être réfléchié par les deux surfaces dans notre œil placé à une position convenable. Des deux faisceaux qui entrent dans notre œil, l'un de la surface supérieure et l'autre de la surface inférieure, l'un a parcouru un peu plus de chemin que l'autre par suite de l'épaisseur de la pellicule d'huile. Pour une certaine longueur d'onde, cette distance supplémentaire sera juste un nombre impair de demi-longueurs d'onde, et, par suite, toute lumière de cette longueur d'onde particulière sera supprimée à notre vue par suite des interférences. La lumière blanche, telle que la lumière du ciel que nous avons considérée, contient, comme nous l'avons vu, un grand intervalle de longueurs d'onde : l'effet de la

pellicule sera de supprimer un type particulier de lumière et d'affaiblir le tout dans son voisinage ; nous verrons donc une pellicule colorée, car si nous supprimons du blanc certaines couleurs, les couleurs restantes ne sont plus blanches. Par exemple, si l'on enlève du rouge au blanc, nous obtenons le bleu paon. De l'épaisseur de la pellicule et de l'angle sous lequel vient la lumière dépend la couleur particulière supprimée, puisque plus petit est l'angle que la lumière incidente fait avec la surface de la pellicule, plus grande est la différence des chemins causée par la réflexion sur les deux surfaces. Tous ces faits peuvent être vérifiés facilement soit avec une pellicule plate de savon obtenue en trempant un anneau en fil de fer dans une solution savonneuse, soit à l'aide d'une pellicule d'huile telle que celle que l'on observe parfois sur l'eau des routes après la pluie. La pellicule d'huile paraîtra différemment colorée en ses divers points par suite de son épaisseur irrégulière, les changements de couleur se succédant plus rapidement l'un l'autre près du bord. Si l'œil se déplace, la couleur en chaque endroit considéré change également. La pellicule plate de savon est particulièrement intéressante car si elle est disposée verticalement elle tendra à perdre son eau de sorte qu'elle sera très mince dessus et plus épaisse dessous, et l'on observera une belle série de bandes horizontales colorées. Les couleurs de la bulle de savon ordinaire, de minces éclats de mica, d'une mince couche d'air pressée entre deux morceaux de verre parfaitement plats ou entre une surface de lentille légèrement courbe et un verre plat, des minces couches de graisse que l'on rencontre parfois dans la viande cuite, de l'écume sur les mares... sont toutes

dues aux interférences et sont des preuves convaincantes de la théorie ondulatoire de la lumière.

Les couleurs des pellicules sont remarquables, non seulement pour leur beauté et pour leur importance scientifique, mais aussi pour leurs applications pratiques. Si nous prenons une surface bien plane et si nous plaçons dessus une autre surface de verre, toute irrégularité de la seconde surface sera décelée par l'irrégularité des bandes colorées produites par les interférences dues aux deux surfaces de verre. Les endroits où la couche d'air entre les deux surfaces est d'épaisseur irrégulière peuvent être ainsi marqués, et la surface peut être travaillée à la main jusqu'à ce qu'une fois placée sur la surface d'essai la couleur soit étalée uniformément. Les meilleurs miroirs et lentilles optiques destinés à des usages scientifiques, tels que les lentilles pour microscopes, sont finis de cette façon, et plusieurs mesures délicates peuvent être faites en interprétant la façon dont se comportent les ondes lumineuses envers l'épaisseur des pellicules.

Si nous nous servons d'une fente brillante et de son image dans un miroir, nous obtenons deux sources lumineuses exactement semblables, et l'effet est exactement celui de notre exemple de l'étang : lorsque la lumière des deux sources ainsi réalisées tombe sur un écran, nous avons alternativement des endroits où le mouvement ondulatoire est intense et des endroits où il est négligeable ; en d'autres termes, il se produit une série de bandes lumineuses et sombres, appelées franges d'interférences. Ces franges d'interférences jouent un rôle des plus importants dans les mesures de laboratoire. Elles offrent l'avantage de fournir une méthode très délicate de détection des faibles varia-

tions de longueur. L'existence d'une bande brillante en un point particulier nous indique que la différence des distances de deux sources lumineuses à cet endroit est un nombre entier de longueurs d'onde ; si nous considérons, par exemple, la bande centrale brillante, la distance du centre de cette bande aux deux sources est exactement la même. Si nous modifions légèrement la longueur d'un des trajets lumineux, même d'une distance qui n'est qu'une fraction de longueur d'onde, par exemple d'un cent-millième de centimètre, la position de la bande se déplacera nettement à une nouvelle position telle que les distances soient *égales*. Si une queue de billard avait une extrémité parfaitement plate et était maintenue verticale sur sa base, une feuille de papier insérée sous un côté de la base ferait déplacer le petit bout de la queue d'une distance relativement grande ; de même, un très faible changement dans un trajet lumineux fait se déplacer le point d'intersection des deux trajets d'une quantité relativement grande qui est détectée sous forme de déplacement des franges.

Comment pouvons-nous modifier la longueur d'un des trajets lumineux sans modifier l'autre ? Dans l'instrument le plus parfait réalisé dans ce but, l'interféromètre, dû au professeur Michelson, la lumière provenant d'une fente tombe sur une plaque de verre placée à 45 degrés sur son chemin ; une partie de la lumière est réfléchiée à angles droits avec son trajet original, tandis qu'une partie passe à travers le verre. Par un dispositif approprié de miroirs, qui peuvent les refouler sur eux-mêmes, les deux faisceaux sont réunis à nouveau et produisent des franges d'interférence, puisqu'il n'existe qu'un seul point pour lequel les

deux chemins soient égaux. Sur la majeure partie de leur chemin, les deux faisceaux se sont déplacés perpendiculairement l'un à l'autre. Nous pouvons modifier un chemin indépendamment de l'autre en déplaçant légèrement le miroir qui le réfléchit. Cet instrument nous permet de mesurer de façon extrêmement précise les longueurs. On l'a utilisé pour essayer de mesurer la vitesse de la terre dans l'éther, vitesse qui a servi de point de départ pour la fameuse théorie de la relativité d'Einstein. Nous allons maintenant examiner brièvement le raisonnement qui a conduit à cet essai et la méthode expérimentale utilisée.

Vers la fin du dix-neuvième siècle, on croyait généralement que tout l'espace est rempli d'une substance subtile qui transporte d'un point à un autre le mouvement ondulatoire que nous appelons lumière ou, de façon plus précise, la lumière était supposée être un mouvement ondulatoire propagé à travers cette matière hypothétique tout comme les ondes sonores se propagent à travers un solide. Cette matière hypothétique était appelée l'éther. Certains savants supposaient qu'il ne pouvait exister de mouvement ondulatoire sans un milieu servant à la propagation de ce mouvement, mais le caractère à ce milieu était tellement vague que l'on pouvait dire qu'il n'était guère qu'un sujet au verbe « onduler ». D'autres considéraient que l'éther avait les propriétés physiques d'un solide élastique et essayaient de lui trouver une élasticité et une densité. Tous étaient d'accord sur le point suivant : si l'éther était une réalité, il serait possible de mesurer la vitesse avec laquelle notre terre le traverse. Si nous réussissions à mesurer cette vitesse, l'éther nous four-

nirait un point de comparaison absolu du repos et nous pourrions parler d'une vitesse mesurée par rapport à l'éther comme vitesse absolue, par contraste avec les vitesses qui sont rapportées aux autres corps célestes, seules vitesses que nous puissions mesurer actuellement, sans pouvoir dire que telle ou telle étoile est immobile.

La méthode proposée pour mesurer la vitesse de la terre à travers l'éther dépendait de ce principe : si la lumière se déplace à travers un éther fixe, et si la terre se déplace pareillement, bien qu'avec une vitesse beaucoup moins grande, à travers cet éther, un signal lumineux émis dans la direction du mouvement terrestre et réfléchi à son point de départ mettra un peu plus de temps qu'un signal émis à angles droits avec la direction du mouvement terrestre et réfléchi également, les deux trajets étant cependant d'égale longueur. La différence de durée des deux trajets nous permettrait de calculer la vitesse de la terre à travers l'éther. On a l'habitude d'illustrer le fait par l'exemple d'un homme ramant sur une large rivière avec courant, d'un kilomètre de largeur par exemple. Si cet homme rame en descendant le courant sur une longueur d'un kilomètre et s'il remonte ensuite le courant sur la même longueur, il est évident que le courant le favorisera dans un sens et le contrariera dans l'autre ; néanmoins, son double voyage durera plus longtemps que s'il avait traversé deux fois la rivière perpendiculairement à la direction du courant. C'est qu'en effet il fait le voyage de descente du courant avec une vitesse obtenue en ajoutant la vitesse du courant à sa propre vitesse, de sorte qu'il est *aidé* par le courant pendant un temps relativement *court*.

Au retour, il est *contrarié* par le courant pendant un temps relativement *long*. Supposons que sa vitesse sur l'eau immobile soit de quatre kilomètres à l'heure et que le courant ait une vitesse de trois kilomètres à l'heure ; il descendra le courant à la vitesse absolue de sept kilomètres à l'heure, en parcourant le kilomètre dans un septième d'heure au lieu d'un quart. Mais au retour, il n'aura plus qu'une vitesse absolue, par rapport à la rive, de un kilomètre à l'heure, et il ne fera le kilomètre que dans une heure. La durée du voyage entier sera donc de huit septièmes d'heure, au lieu d'une demi-heure sur l'eau calme. La traversée dans la direction perpendiculaire au courant est aussi quelque peu allongée par le courant, mais dans une moindre mesure. Si le rameur n'avait pas d'autre moyen de mesurer la vitesse du courant, il pourrait obtenir cette vitesse en notant le temps mis pour les deux voyages différents et en comparant les résultats ; bien entendu, il lui faut aussi connaître sa vitesse sur l'eau sans courant.

Dans le cas de l'éther, la vitesse de la terre est très faible en comparaison de celle de la lumière, de sorte que l'effet à attendre du mouvement de la terre serait excessivement faible : une différence d'environ un pour cent millions. C'est ici qu'apparaît la nécessité de l'interféromètre. Supposons que nous puissions le régler de façon à ce que l'un des deux trajets lumineux, qui se trouve perpendiculaire à l'autre, soit dans la direction du déplacement terrestre à travers l'éther. Des franges d'interférences seront formées. Si, maintenant, nous faisons tourner l'ensemble de l'appareil d'un angle droit, l'autre trajet lumineux vient dans la direction du mouvement de la terre, et devient celui

pour lequel la vitesse de la lumière est amoindrie, de sorte qu'il devra se produire un déplacement des franges s'il existe une différence de vitesse de la lumière dans les deux directions. C'est là l'essence de la fameuse expérience de Michelson-Morley, faite tout d'abord en 1887 avec le plus grand soin, et répétée plusieurs fois depuis. Au cours d'une de ces expériences faites par les Professeurs Morley et Miller, les longueurs des trajets lumineux étaient de 32 mètres chacun grâce à des réflexions successives, ce qui représente 55 millions d'ondes de la lumière jaune utilisée ; on pouvait ainsi s'attendre à ce que la variation du trajet due au mouvement de la terre (un pour cent millions) soit un peu supérieure à une demi-longueur d'onde, qui est doublée car la rotation d'un angle droit interchange les trajets. On aurait donc dû constater un déplacement d'un peu plus d'une frange d'interférence entière ; or il est possible de mesurer moins d'un centième de cette frange. Si l'on se rappelle que la durée entière du trajet lumineux d'une trentaine de mètres est d'un dix-millionième de seconde, que la différence de temps des deux trajets considérés n'est qu'un cent-millionième de l'intervalle de temps précédent, et que nous pouvons mesurer un effet encore inférieur à un centième de ce chiffre, on se rend compte des possibilités de l'interféromètre.

Le résultat de l'expérience de Michelson-Morley fut négatif : aucun effet du mouvement terrestre dans un éther hypothétique sur la vitesse de la lumière ne fut constaté. Il est vrai qu'en 1925, l'annonce faite par Miller qu'il avait obtenu un très faible effet créa une sensation dans le monde de la physique, mais il n'en obtint aucune autre confirmation, et depuis lors deux

autres expérimentateurs américains, R. J. Kennedy et K. K. Illingworth, travaillant indépendamment à Pasadena ont répété plusieurs fois très soigneusement l'expérience, mais sans obtenir de résultats positifs. Tout récemment, Michelson lui-même a annoncé que de nouvelles expériences faites par lui n'avaient révélé aucun effet. On ne peut donc détecter aucun mouvement de la terre à travers l'éther, ce qui veut dire qu'il n'existe pas d'éther jouissant des propriétés de tout corps matériel. Ce fut pour expliquer cet effet extraordinaire qu'Einstein imagina primitivement sa théorie de la relativité, qui implique comme caractéristique fondamentale cette impossibilité de mesurer tout déplacement dans l'espace au moyen de signaux lumineux. Quelles que soient la vitesse ou la direction du déplacement de l'expérimentateur, il trouve toujours le même résultat pour la vitesse de la lumière. La vitesse de la lumière est une des quantités les plus fondamentales dans la physique, et elle a été mesurée avec un degré de précision extraordinaire. Michelson a fait de nouvelles mesures au cours des dernières années et il a trouvé 299.796 kilomètres par seconde, avec une erreur possible de un kilomètre seulement.

Un second champ d'utilisation de l'interféromètre plus pratique, est le suivant : étant donné la difficulté de s'assurer que toute distance entre les marques d'une barre métallique a le degré de permanence désiré, on a songé à utiliser l'interféromètre pour la mesure de l'étalon de longueur. La longueur de la barre change avec la température mais ceci, bien entendu, peut être évité en faisant la comparaison toujours à la même température. La longueur d'une barre métallique tend aussi à changer avec l'âge,

par suite de réarrangements internes très lents des molécules ; bien que, grâce à de grandes précautions dans la préparation et la conservation de la barre, ces variations puissent être certainement rendues extrêmement petites, le monde scientifique ne peut s'habituer à l'idée de dépendre pour son étalon de mesure d'une barre particulière de métal plutôt que de quelque chose dans la Nature qui ne change pas, quelque chose toujours à portée de la main et invariable par essence. Primitivement, on avait proposé que la terre elle-même soit prise comme étalon, et le mètre français fut défini en 1800 comme le dix-millionième de la distance du Pôle à l'Equateur mesurée le long d'un méridien. Cette distance ne peut être, cependant, déterminée de façon suffisamment précise pour servir d'étalon. Après de nombreuses discussions, on a proposé d'employer comme étalon de longueur la longueur d'onde d'une lumière très pure émise par le cadmium ; cet élément a été choisi parce que la longueur d'onde de certaines de ses lignes spectrales est particulièrement définie et non un mélange de longueurs d'ondes très voisines. L'atome de cadmium, qui est le même en tous temps et dans toutes les parties du monde, devient ainsi l'instrument de comparaison, mais comme une longueur d'onde lumineuse n'est pas une chose facile à manipuler pour l'ingénieur, et n'est même pas commode pour le physicien qui désire mesurer une longueur, la question se pose de trouver combien il existe de ces longueurs d'onde dans n'importe quelle barre prise comme étalon. Nous pouvons alors vérifier de temps en temps si la barre a conservé exactement sa longueur, et ce qui est également important, nous pouvons vérifier

des barres étalons en différents points du monde en fonction de la longueur d'onde étalon fournie par l'atome de cadmium.

Grâce à l'application de l'interféromètre de Michelson, la longueur du mètre étalon à Paris a été déterminée en fonction de la longueur d'onde du cadmium, et nous savons maintenant que la distance entre les marques de la barre précieuse contient 1.553.163,5 longueurs d'onde de lumière de cadmium rouge (dans l'air à la température et à la pression ordinaires). Ce résultat est certainement exact à moins de un pour un million ¹. Aussi étrange que cela puisse paraître, notre étalon de comparaison en ce qui concerne les mesures de longueur provient donc d'une lampe électrique spéciale contenant de la vapeur de cadmium.

L'interféromètre est aussi utilisé pour la recherche des défauts minuscules des lentilles de valeur. Ainsi, voici un instrument qui a conduit à la théorie de la relativité et qui nous sert maintenant à établir un étalon de longueur et à perfectionner les lentilles photographiques. Derrière tout cela, se trouve la théorie ondulatoire de la lumière, et la parfaite régularité de la façon dont elle se comporte nous donne confiance dans notre théorie, à savoir que la lumière possède les propriétés périodiques d'un mouvement ondulatoire.

Une application sensationnelle des propriétés des interférences que possède la lumière a été la première mesure du diamètre d'une étoile. Bien que certaines

¹ La répétition de la mesure du mètre en fonction de la lumière de cadmium faite avec des appareils différents par MM. Benoît, Fabry et Perot, a donné 1.553.164,13 ; cette valeur ne diffère de la valeur de Michelson que de 1 sur 2.400.000.

étoiles, les « géantes » comme on les appelle, soient énormément plus grandes que le soleil, elles sont si éloignées que même vues avec le plus gros télescope elles semblent de simples points lumineux et ne présentent aucun disque dont le diamètre puisse être mesuré. Supposons donc que nous fassions tomber la lumière d'un point très éloigné sur deux miroirs convenablement disposés, et que les lumières des deux miroirs soient confondues à l'aide d'un système de lentilles ; il est évident d'après ce que nous avons dit, que des franges d'interférences, — bandes éclairées et bandes sombres alternées, — seront produites. Plus grand sera l'intervalle de séparation des deux miroirs, plus étroites seront les franges. Considérons maintenant ce qu'il en advient de la lumière reçue par le même système de miroirs et de lentilles, d'un point éloigné très proche du premier point considéré. Un système de franges d'interférences se formera également, mais un peu sur le côté du premier groupe. Si les deux points éloignés sont séparés d'un certain intervalle, les parties brillantes des franges dues à l'un tomberont sur les parties sombres des franges dues à l'autre et il n'y aura pas de franges visibles. La longueur d'onde de la lumière étant excessivement faible, un simple calcul montre que si les miroirs qui reçoivent la lumière des deux points sont séparés par une distance de quelques pieds, l'angle formé par les lignes joignant les deux points à l'œil de l'observateur n'a qu'à être excessivement petit pour que les franges disparaissent.

Pour simplifier, nous avons considéré les franges formées par deux points : nous pouvons appliquer le même raisonnement à un disque brillant composé

d'un certain nombre de points. Les franges formées par certains de ces points annuleront celles formées par les autres points, si la dimension angulaire du disque offre une certaine relation avec l'écart des miroirs et la longueur d'onde de la lumière. Ce sont là les principes sur lesquels Michelson basa ses mesures de la dimension de l'étoile géante « Bételgeuse » qui est une des deux étoiles très brillantes de la constellation d'Orion. Les deux miroirs furent fixés sur un chassis se déplaçant à travers l'extrémité du grand télescope de 250 cm. du Mont Wilson, de façon à former avec le télescope un énorme T, et ils furent graduellement déplacés jusqu'à ce que les franges disparaissent, ce qui se produisit quand la séparation des miroirs était de 3 mètres. La longueur d'onde de la partie effective de la lumière étant d'environ cinquante-sept millièmes de centimètre, le diamètre angulaire de l'étoile fut calculé de 0,047 seconde d'arc, ce qui veut dire que vue de la terre elle paraît de la même dimension qu'une pièce d'un sou brillante vue à la distance de 110 kilomètres. Inutile de dire qu'aucun télescope dirigé sur un sou à cette distance ne nous révélerait que cette pièce a un diamètre. Il est remarquable que l'atmosphère soit suffisamment tranquille et clair pour nous permettre d'observer les franges ; en fait, la crainte des perturbations atmosphériques empêcha longtemps toute expérience de ce genre. Ajoutons que d'autres mesures ont montré que la distance de Bételgeuse est d'environ 1.500 millions de millions de kilomètres ; le diamètre de l'étoile est donc de plus de 320 millions de kilomètres. En d'autres termes, si le centre de l'étoile était placé au centre de notre soleil,

l'orbite de notre terre tomberait à l'intérieur de l'étoile qui remplirait même presque l'orbite de Mars.

Un autre aspect de la théorie des ondes réclame notre attention. Nous savons que les ondes sonores peuvent contourner les angles : un mur en briques, par exemple, n'arrête pas le son à son extrémité, et il faut s'éloigner assez loin de l'extrémité, à l'abri du mur, pour que son action contre le son soit nette. De la même façon, les rides à la surface d'un étang s'étendent quelque peu derrière toute planche ou tout corps semblable placé sur leur chemin. Si les ondes ont la propriété de contourner les obstacles, comment se fait-il donc que la lumière projette une ombre nette et ne semble pas contourner les obstacles ? La réponse est que la propriété de contourner les angles dépend de la longueur d'onde ; elle est d'autant plus importante que la longueur d'onde est plus grande. Dans le cas de la lumière, par suite de sa faible longueur d'onde, cet effet est très faible, mais il existe néanmoins et l'on a vérifié qu'une source étroite de lumière ne projette *pas* une ombre nette sur un obstacle mais forme plutôt une série de très fines bandes alternées noires et claires qui sont appelées franges de diffraction ; la déviation autour de l'obstacle est appelée diffraction.

Si la propriété de contourner les obstacles dépend de la longueur d'onde, il faut s'attendre à ce qu'elle soit différente pour les différentes lumières colorées, de sorte que lorsque de la lumière blanche tombe sur une arête, il doit se produire une séparation des couleurs prismatiques au bord de l'ombre. On a vérifié qu'il en est bien ainsi, la lumière rouge qui a la plus grande longueur d'onde, étant la plus déviée et la violette la moins déviée. Ce fait général peut être

aisément vérifié en observant le filament brillant d'une lampe électrique à travers un fin mouchoir de batiste, on voit alors chaque fil entouré d'une série de franges colorées. C'est sur ce phénomène que sont basées les mesures systématiques de la longueur d'onde de la lumière, surtout des lignes spectrales. La lumière provenant d'une mince fente est envoyée à travers une plaque de verre portant une réglure, faite au moyen d'une pointe de diamant, suivant des lignes parallèles très rapprochées. Une telle plaque est appelée réseau de diffraction et doit être réglée de façon que les lignes soient parallèles à la fente. Les lignes de la réglure, qui sont en réalité des sillons émoussés, sont relativement opaques, de sorte que nous avons en fait une série de fentes claires très fines. La lumière est déviée suivant un angle qui dépend de la longueur d'onde ainsi que de la distance entre les lignes : avec le genre de dimensions employées, à savoir environ 6.000 lignes par centimètre, la déviation est très grande. La mesure de l'angle de déviation est soigneusement faite, et on en déduit la longueur d'onde. La théorie de la diffraction est un peu compliquée et nous n'en avons donné ici qu'une indication très grossière. La gravure des réseaux nécessite une très grande habileté technique et les bons réseaux sont très appréciés et atteignent de hauts prix. Rowlands, de Baltimore, a consacré plusieurs années à leur production et au cours de ses travaux a grandement perfectionné le taillage précis des vis. Ainsi, en physique, une chose conduit à une autre.

Quelle est donc la leçon générale des phénomènes d'interférence et de diffraction, qui occupent, comme

nous l'avons vu, une si grande place dans la physique moderne ? Nous répondrons que, quoi que soit la lumière, c'est quelque chose qui passe à travers l'espace vide avec une vitesse parfaitement déterminée et qui produit des effets qui montrent qu'elle doit avoir les propriétés alternatives ou périodiques des ondes.

Jusqu'à présent, nous n'avons parlé que de la lumière visible à l'œil humain. Cependant, de même qu'il existe des vibrations de l'air qui ne sont pas audibles, telles que celles causées par une planche oscillant deux ou trois fois par seconde, ou, à l'autre extrême, les vibrations ultrasoniques, de même il existe des vibrations de même nature que la lumière ordinaire qui ne sont pas perçues par l'œil. Au delà du violet, il existe des ondes plus courtes (ou des vibrations de plus haute fréquence) qui ont un effet intense sur la plaque photographique, et sont appelées rayons ultra-violets. Ce terme ne veut pas dire que la couleur de ces rayons soit violette, mais simplement qu'ils se trouvent *au delà* du violet. Il existe différentes espèces de lumière ultra-violette, de même qu'il existe différentes espèces de lumière visible correspondant à des fréquences différentes. Les fréquences immédiatement plus élevées que le violet visible passent à travers le verre des vitres ordinaires et des lentilles d'appareils photographiques. Quand la fréquence devient encore plus élevée, les rayons ne passent plus à travers le verre ordinaire et il faut des verres spéciaux pour les laisser passer. Les rayons de soleil qui produisent le hâle sont des rayons ultra-violets dont la longueur d'onde varie autour de trois cent-millièmes de centimètre, chiffre que l'on comparera

aux quatre cent-millièmes de centimètre qui sont les plus courtes ondes violettes visibles. Non seulement ces rayons ne passent pas à travers le verre à vitre ordinaire, mais ils sont absorbés notablement par l'atmosphère, au point qu'en hiver, quand la lumière solaire doit à cause de son obliquité traverser une plus grande épaisseur d'atmosphère qu'en été, il n'en passe à peu près pas du tout. C'est pourquoi même la lumière solaire intense de l'hiver ne produit point de hâle. Les ondes encore plus courtes sont absorbées par de plus faibles épaisseurs d'air, mais peuvent être photographiées à l'aide de plaques spéciales et de lentilles de quartz, le quartz étant une substance qui est très transparente aux rayons ultra-violet. Ces diverses propriétés des différentes espèces de lumière ultra-violette nous montrent les précautions que doivent prendre les docteurs qui se servent de la lumière pour les traitements médicaux.

En avançant encore plus loin dans la région des ondes courtes, nous arrivons aux ondes qui sont absorbées même par une fraction de centimètre d'air, et ne peuvent être photographiées qu'à l'aide de méthodes très spéciales et d'appareils dans lesquels on a fait le vide. Quand, cependant, nous arrivons aux ondes plus courtes que le trois millionième de centimètre, la pénétration commence à croître : nous approchons de la région des rayons X. Car l'une des découvertes les plus frappantes du siècle présent est que les rayons X sont de la même nature que la lumière ordinaire, leurs propriétés particulières étant une conséquence d'une longueur d'onde extrêmement courte. La nature ondulatoire des rayons X nous a été prouvée de la même façon que la nature ondulatoire

de la lumière — en se servant d'un réseau à lignes régulièrement espacées. La structure des rayons X est, cependant, si fine, la longueur d'onde en est si courte, que les réseaux réglés qui permettent la mesure de la longueur d'onde de la lumière sont beaucoup trop espacées pour être utilisables. Mais le physicien allemand Laue a découvert que dans les cristaux dans lesquels les atomes sont espacés en rangées régulières, nous avons un réseau de diffraction fourni par la Nature, convenant à la démonstration et à la mesure de la longueur d'onde des rayons X. Cette découverte a été immédiatement utilisée par Sir William Bragg et son fils, le Professeur W. L. Bragg, qui ont montré comment inversement les rayons X pouvaient fournir des informations très précises concernant la structure des cristaux. Il faut aussi mentionner que tout récemment on a trouvé possible d'utiliser des réseaux réglés artificiellement pour donner des résultats avec les rayons X dans certains cas extrêmes.

Les rayons X utilisés par les docteurs pour les diagnostics ont des longueurs d'onde de quelques millièmes de millionième de centimètre, tandis que ceux utilisés pour des buts curatifs sont encore plus courts. Finalement, un certain type de rayons provenant du radium a les mêmes propriétés que les rayons X, mais est encore de plus courte longueur d'onde : ces rayons, appelés rayons gamma, ont dans les cas extrêmes, des longueurs d'onde de moins d'un dix-millième de millionième de centimètre.

Les rayons gamma représentent les plus courtes longueurs d'onde que nous puissions engendrer en laboratoire. Ce sont en même temps les plus pénétrants : même après leur passage à travers une plaque

de plomb de 25 centimètres d'épaisseur, l'effet des rayons gamma du radium et de ses produits peut être encore détecté. Récemment, cependant, on a eu suffisamment de preuves montrant que des rayons encore plus pénétrants ayant leur origine en dehors de la terre viennent à travers l'atmosphère et pénètrent de quelques mètres dans l'eau ou la terre. La difficulté expérimentale est de faire la distinction entre ces rayons et les rayons gamma dus au radium qui existe dans la terre elle-même ; les effets sont très petits et demandent à être soigneusement démêlés. Cependant, en lâchant des ballons emportant des instruments délicats pour détecter les rayons et en immergeant des instruments sous la surface des lacs profonds formés par l'eau des neiges, l'existence de ce type de radiation a été définitivement établie. Les ballons montrent que la radiation augmente d'intensité lorsque nous montons aux hautes altitudes, ce qui est normal pour une radiation venant de l'extérieur, puisqu'elle a moins d'air à traverser aux hautes altitudes, tandis qu'une radiation provenant de la terre doit au contraire s'affaiblir en s'élevant. L'eau provenant de la fonte des neiges ne contient aucune substance d'origine minérale, donc aucune trace de radium produisant des rayons gamma ; les mesures ont montré que l'effet décroît lorsque nous immergeons les instruments dans l'eau, ce qui prouve bien qu'il s'agit de radiations venant de l'extérieur. La radiation peut être détectée à une quinzaine de mètres au-dessous de la surface, ce qui indique une radiation très pénétrante ; les rayons X ordinaires ne pénétreraient dans l'eau qu'à un pied ou deux au plus.

On a d'abord suggéré que ces radiations mysté-

rieuses provenaient du soleil, mais on découvrit qu'il ne se produit aucune différence dans ces radiations le jour et la nuit. Actuellement, on admet que les radiations pénétrantes proviennent de l'espace extérieur et on les appelle *rayons cosmiques*. D'après leur pouvoir de pénétration, nous pouvons admettre que leur longueur d'onde doit être beaucoup moindre que celle des rayons gamma ; la valeur exacte déduite dépend de la nature de l'argument mathématique, mais il varie autour d'un millionième de millionième de centimètre, c'est-à-dire que ces ondes sont dix millions de fois plus courtes que les ondes lumineuses ordinaires qui, à leur tour, sont quelques centaines de millions de fois plus courtes que les ondes ordinaires radio-électriques. Si le monde entier, ainsi que ses stations de télégraphie sans fil et les ondes émises, étaient réduits jusqu'à ce que celui-ci ne soit plus qu'un grain de poussière, les ondes radioélectriques ainsi réduites seraient encore cent mille fois plus grandes que les rayons cosmiques.

L'origine de ces rayons cosmiques, qui forment la limite des courtes longueurs d'onde de notre « spectre électromagnétique » est encore douteuse, mais il se peut qu'ils résultent de la construction d'atomes dans des régions éloignées de l'espace extérieur où, comme Millikan l'énonce poétiquement, les rayons sont les « cris de naissance » des atomes. Nous en reparlerons succinctement au chapitre VII.

Nous passons maintenant à l'autre extrémité du spectre, celle des grandes longueurs d'onde, au delà du rouge visible, où se trouvent les rayons invisibles infra-rouges qui peuvent être détectés par leurs effets calorifiques. Une bouillotte d'eau bouillante dans une

chambre obscure ne donne pas de lumière visible, mais si elle est suspendue et que la main soit placée dessous (de façon à ne pas être affectée par l'air chaud qui en monte) à une faible distance une sensation de chaleur sera ressentie qui est due à des radiations invisibles. Les radiations infra-rouges n'affectent pas les plaques photographiques ordinaires, mais il existe des plaques spéciales qui sont sensibles à leur effet et on a réussi à photographier dans une chambre parfaitement sombre une bouillotte uniquement grâce aux radiations calorifiques invisibles qu'elle dégage. Bien entendu, les radiations lumineuses ordinaires, si elles sont suffisamment intenses, produisent également un effet de chauffage distinct : dans le cas de la lumière solaire, le plus grand effet de chaleur est obtenu avec le jaune visible. Dans le cas des radiations infra-rouges, cependant, l'effet de chaleur prend une importance particulière car c'est la propriété qui permet de les détecter le plus facilement. L'effet de chaleur des rayons ultra-violet est ordinairement beaucoup trop petit pour être mesuré, néanmoins il existe.

Avec les longueurs d'onde plus longues, nous arrivons aux ondes électromagnétiques qui sont engendrées en télégraphie sans fil. En pratique, elles sont ordinairement mesurées en centaines de mètres, mais comme curiosité de laboratoire, on a réussi à en produire qui n'avaient qu'une faible fraction de centimètre. Nous pouvons dire alors qu'en employant le mot « lumière » au sens le plus général, nous avons un spectre qui s'étend sans trous (car tous les trous ont été récemment bouchés) depuis des longueurs d'onde de centaines de mètres jusqu'à environ un dix-millième de millièème de centimètre, dont seule-

ment un faible intervalle est visible à l'œil. Si nous appelons une octave une bande de radiations s'étendant depuis une fréquence donnée au double de cette fréquence, nous pouvons dire que notre spectre complet consiste en soixante octaves dont une seulement est visible.

Quelles sont les propriétés que possèdent en commun toutes ces ondes ? Les effets d'onde caractéristiques d'interférences et de diffraction ont été démontrés avec les rayons X les plus courts en utilisant les régularités de la structure cristalline, l'espacement égal naturel des atomes dans un cristal remplaçant, pour ces ondes courtes, les réseaux artificiellement réglés utilisés avec la lumière ordinaire. Avec les ondes ultra-violettes, des réseaux réglés peuvent être utilisés, avec des milliers de lignes au centimètre, tandis que pour les longues ondes infra-rouges des méthodes de réflexion ont été employées pour démontrer les interférences. Chose plus remarquable encore, le Professeur E. V. Appleton, s'est servi récemment de la couche d'Heaviside pour démontrer directement la nature ondulatoire des ondes radioélectriques, ou plutôt, puisque la nature ondulatoire était déjà démontrée par ailleurs, pour démontrer l'existence de cette couche. Ses expériences révèlent sur une énorme échelle exactement les mêmes effets que ceux produits par la lumière ordinaire. La couche d'Heaviside est une portion de l'atmosphère à une centaine de kilomètres de hauteur, qui jouit de la propriété électrique particulière de se comporter comme un miroir pour les ondes radioélectriques. Les ondes réfléchies par la couche ont un parcours plus long que celles qui progressent le long du sol, et si la différence de

trajet est une demi-longueur d'onde ou un multiple, le même genre d'interférences se produit que celui décrit pour la lumière ordinaire, mais ici les longueurs d'onde sont mesurées en centaines de mètres au lieu d'être mesurées en millièmes de centimètre. La dimension des franges d'interférence est proportionnellement grande. Cette interférence des ondes radioélectriques directes et réfléchies explique les particularités de la transmission à courtes distances appelées « fading ». Elle n'est citée ici que pour montrer la généralité des idées de la physique moderne et comment les principes établis dans une branche se vérifient, souvent avec une grande importance pratique, dans une autre branche de la physique.

Toutes les différentes espèces d'ondes « lumineuses » ont la même vitesse dans le vide, ce qui suggère l'idée d'une nature commune. Ce sont toutes des ondes électromagnétiques. Ce qui varie périodiquement est la force électrique perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde : nous devons nécessairement trouver des fluctuations de force magnétique qui accompagnent les variations de force électrique, cette force magnétique étant également à angles droits avec la direction de propagation de l'onde et à angles droits avec la force électrique. Ainsi, si une onde se déplace à travers la page, de gauche à droite, il y aura une force électrique dans la direction de haut en bas de la page, par exemple, qui pointe d'abord en haut, puis en bas, se réduisant progressivement à rien puis croissant dans le sens opposé au cours de chaque oscillation tandis que la force magnétique sera perpendiculaire à la feuille de papier et subira de pareilles fluctuations. Il vaut donc

mieux parler de notre spectre général comme le spectre d'ondes électromagnétiques, la lumière ordinaire étant une onde électromagnétique avec un intervalle particulier de longueurs d'onde.

S'il en est ainsi, nous devons pouvoir démontrer expérimentalement les effets électriques et magnétiques avec la lumière ordinaire. Faraday, il y a longtemps, était convaincu, grâce à cet instinct de vérité qu'il possédait (« Il flaire la vérité », disait en parlant de lui un grand savant allemand), qu'il existait une connexion de ce genre et démontrait qu'un champ magnétique exerce un certain effet sur de la lumière passant à travers du verre pesant. Cet effet, connu sous le nom d'effet de rotation du plan de polarisation, est un peu trop complexe pour être expliqué dans ce court exposé. De même, nous ne pouvons que citer l'effet découvert par Zeeman qui montra que la lumière d'une source placée dans un champ magnétique intense est modifiée de façon particulière en comparaison de la lumière de la même source sans champ magnétique. Il existe pourtant une connexion entre la lumière et l'électricité, dont la nature générale est simplement comprise et qui a, cependant, pris une très grande importance de nos jours. Elle est appelée effet photo-électrique et offre des applications pratiques intéressantes en même temps qu'une profonde signification théorique.

L'effet photo-électrique se produit quand de la lumière de courte longueur d'onde tombe sur une surface métallique propre, une plaque de zinc soigneusement polie, par exemple. La plaque perd alors de l'électricité négative et se charge positivement. Il a été prouvé par de nombreuses expériences qu'il se

produit le phénomène suivant : de petits atomes d'électricité négative dont la nature sera discutée dans le chapitre suivant, sortent du métal sous l'effet de la lumière. Plus intense est la lumière, plus il y a d'électrons qui sortent de la plaque toutes les secondes. Si l'intérieur d'une ampoule en verre dans laquelle on a fait le vide est revêtu d'une couche de métal approprié (car certains métaux tels que le potassium et le rubidium sont beaucoup plus sensibles que d'autres à ce point de vue), et si un fil pénétrant à l'intérieur de l'ampoule sert à enlever les électrons au fur et à mesure qu'ils sont libérés, un faible courant peut être obtenu qui indique l'intensité de la lumière. Ces *cellules photo-électriques*, comme on les appelle, servent en télévision et dans les films parlants, car par leur intermédiaire les fluctuations de lumière peuvent être transformées en fluctuations de courant électrique qui, à leur tour, peuvent être converties en sons comme dans le téléphone ordinaire. Ainsi, dans le cas du film parlant, puisque le son peut être utilisé pour créer des fluctuations lumineuses (et cela très simplement à l'aide d'une mince plaque qui vibre sous l'action du son), une bande d'alternances lumineuses et sombres peut être enregistrée sur le côté de la pellicule. La façon particulière dont les parties lumineuses et les parties sombres se suivent et se fondent les unes dans les autres correspond à un son particulier. Quand on veut reproduire le son, cette bande est déroulée à travers un faisceau lumineux dont les fluctuations correspondent au son primitif, et la lumière, tombant sur une cellule photo-électrique, sert à actionner un mécanisme producteur de son, de la manière indiquée.

Le nombre d'électrons libérés ne représente, cependant, qu'un côté de la question ; une autre face du problème est la vitesse ou l'énergie avec laquelle les électrons sortent du métal. Chose étrange, cette vitesse n'est pas influencée par l'intensité de la lumière, mais seulement par sa fréquence. La lumière bleue libère des électrons de faible énergie de mouvement ; la lumière violette produit des électrons d'énergie quelque peu plus grande ; la lumière ultra-violette cause l'émission d'électrons encore plus rapides, mais cependant moins rapides que ceux dus aux rayons X. L'énergie fournie aux électrons avant leur départ du métal, est, en fait, proportionnelle à la fréquence de la lumière. C'est là un fait fondamental de la physique moderne.

Considérons la question à un autre point de vue. Supposons que nous fassions en sorte que les électrons frappent un morceau de métal avec une énergie donnée, ce que nous pouvons faire en libérant les électrons d'un fil chaud, comme nous le faisons dans la lampe à trois électrodes employée en télégraphie sans fil, et en les projetant à l'aide d'un champ électrique, tout comme dans le vieux jeu de balle à la volée avec trappe on fait d'abord sauter la balle hors de la trappe, puis on la frappe avec une crosse. Quand les électrons frappent une plaque métallique, il y a production de rayons X. L'expérience doit se faire dans un tube à vide très poussé de façon qu'il y ait très peu de molécules d'air pouvant se mettre sur le trajet des électrons et risquant de leur faire perdre de leur vitesse ; un tube ainsi réalisé est un tube à rayons X du modèle employé dans les hôpitaux. Si, en utilisant une tension élevée, nous faisons voler très

vite les électrons de façon à ce qu'ils viennent frapper la plaque métallique avec une grande énergie, il y a production de rayons X très pénétrants (rayons X « durs », comme les médecins les appellent), c'est-à-dire des ondes de très faible longueur d'onde et de fréquence élevée. Si les électrons frappent le métal avec moins d'énergie, les rayons X produits sont de plus grande longueur d'onde et de fréquence plus petite. Supposons à nouveau que nous envoyions un flux d'électrons qui, par comparaison, soit très lent et ait une faible énergie, à travers un gaz ; nous produisons alors des ondes qui sont tellement plus grandes que les rayons X, qu'elles constituent de la lumière visible ; c'est ce qui se produit dans le tube à incandescence rose utilisé pour la publicité et qui est appelé tube au néon. Dans chaque cas, l'envoi d'un plus grand nombre d'électrons ne modifie pas la fréquence des ondes produites, mais en augmente simplement le nombre : nous obtenons une lumière plus brillante. C'est comme si en acoustique la note d'un gong dépendait de la violence avec laquelle on le frappe, la note étant d'autant plus élevée que le coup est plus violent, tandis que l'intensité du son dépendrait du nombre de coups. Le problème se présente donc de la façon suivante : l'énergie nécessaire pour produire *un seul* train d'ondes de n'importe quel genre de « lumière », dépend de la fréquence de la lumière produite, tandis que, si un seul train d'ondes lumineuses produit un électron venant d'un atome, l'énergie de cet électron dépend de la fréquence de la lumière. Ce fait étrange est à la base de la théorie des quanta qui sera expliquée chapitre VI. Nous le mentionnons ici simplement pour montrer qu'il y a

certaines aspects de la lumière qui ne peuvent être expliqués par la simple théorie des ondes, car cette théorie seule ne nous conduirait pas à supposer une relation entre la fréquence d'un simple groupe d'ondes et son énergie.

Il existe d'autres effets électriques de la lumière qui sont des plus utilisés aujourd'hui. Si de la lumière tombe sur une pellicule de sélénium préparée d'une certaine façon, la résistance électrique du sélénium diminue ; par suite, si nous relions le sélénium à une batterie d'accumulateurs, un courant plus intense circule, lorsque la lumière la frappe, qui peut être amplifié autant que nous le voulons par la technique des lampes à trois électrodes. Si la lumière subit des fluctuations, le courant variera de façon correspondante, de sorte que nous pouvons utiliser une cellule de sélénium pour transformer de la lumière, variant de façon appropriée, en parole, de même que nous pouvons utiliser une cellule photoélectrique. Il existe de nombreux autres usages pratiques de la cellule de sélénium. En certains points, à Londres, les lumières des rues sont allumées automatiquement à l'aide de cellules de sélénium : dès que la lumière du jour tombe, la résistance de la cellule augmente et la variation de courant fait actionner un commutateur. Des sonnettes d'alarme contre les vols peuvent fonctionner sur le même principe : dès que l'on fait de la lumière dans une salle sombre, une sonnerie est actionnée. Toutes ces applications sont intéressantes, mais pour le but que nous nous sommes proposé, la chose importante à noter est que la lumière visible et invisible est une manifestation de force électrique qui produit des effets électriques évidents.

L'étude de la lumière, donc, tout comme plusieurs autres parties de la physique, semble être l'étude de l'énergie, l'étude des ondes et l'étude de l'électricité. Ce sont là trois aspects connexes de la même question. A un certain moment nous fixons notre attention sur l'un, à un autre moment sur l'autre, mais on ne peut pas les considérer indépendamment. Si nous comprenions parfaitement une partie de la physique, nous comprendrions toutes les autres.

CHAPITRE V

Au sujet de l'Électricité et du Magnétisme

Le mot *électricité* dérive du mot grec *electron*, qui veut dire *ambre*, car on connaissait déjà dans les temps antiques la propriété de l'ambre qui, une fois frotté, acquiert la propriété d'attirer les corps légers tels que les brins de paille ou les brins de plume. Nous disons aujourd'hui que l'ambre se charge d'électricité et nous savons que si nous plaçons un corps, une plaque métallique par exemple, sur un support isolant, nous pouvons lui communiquer une partie de la charge simplement en le touchant avec l'ambre ainsi électrisé. Si nous suspendons deux balles légères à l'aide de fils de soie, qui ne conduisent pas l'électricité, et si nous les chargeons au moyen d'un morceau d'ambre électrisé (ou de cire à cacheter, ou de verre, car ces corps et bien d'autres s'électrisent une fois frottés), elles se repoussent si on les rapproche, de sorte que l'on peut dire que deux charges électriques de même espèce exercent une force de répulsion l'une sur l'autre. On a constaté, cependant, que si un bâton de cire à cacheter est frotté avec de la laine, puis est utilisé pour charger d'électricité une petite balle, tandis qu'une seconde balle est chargée à l'aide d'une tige de verre convenablement

frottée, les deux balles s'attirent l'une l'autre. Ceci montre qu'il doit exister deux sortes différentes d'électricité car, en prenant une balle chargée, nous pouvons, en choisissant une substance appropriée, charger une seconde balle soit de façon à attirer, soit de façon à repousser la première balle. Si les deux balles sont chargées de la même espèce d'électricité — électricité du verre ou électricité de la cire à cacheter, comme nous les appellerons pour le moment — elles se repoussent l'une l'autre ; si elles sont chargées d'électricités différentes, elles s'attirent. Les deux espèces différentes d'électricité sont toujours engendrées quand un corps est électrisé par frottement, car si le corps, une tige de verre par exemple, acquiert une charge d'une espèce, l'étoffe utilisée acquiert une charge d'une autre espèce et d'égale valeur, comme on peut le montrer expérimentalement. Le frottement ne produit donc pas, en somme, de l'électricité, mais sépare les deux espèces en quantités juste suffisantes pour les neutraliser l'une l'autre complètement si elles sont rapprochées à nouveau.

Les deux espèces d'électricité, qui se distinguent par le sens de la force qu'elles exercent l'une sur l'autre, sont toujours appelées électricités positive et négative, l'électricité du verre étant appelée positive, l'électricité de la cire à cacheter étant appelée négative. Il n'y a pas de raison particulière à cette désignation, pas plus qu'aux noms choisis pour représenter des partis politiques, par exemple, mais une fois le choix arbitraire fait, nous nous y tenons.

Chacun sait qu'en réunissant les pôles d'une batterie d'accumulateurs électriques ou d'une pile par un fil métallique, un courant électrique passe à

travers le fil. Ceci signifie que le fil acquiert certaines propriétés spéciales : il exerce une force sur un aimant placé dans son voisinage, il s'échauffe (si le fil est très bon conducteur, l'effet d'échauffement est faible, mais n'en existe pas moins ; si le fil a une résistance élevée, l'échauffement est très net : c'est le cas de la lampe électrique ou du radiateur électrique). En outre, si l'on coupe le fil et si l'on fixe à chaque extrémité des plaques métalliques que l'on plonge dans une solution de sels métalliques, une action chimique se produit, comme le prouve la décomposition du métal dans les bains d'argentage ou de nickelage. Nous pouvons donc dire qu'un courant électrique a un effet calorifique, magnétique et chimique. Autrefois, on avait l'habitude de distinguer entre l'électricité de courant produite par une pile et l'électricité de frottement produite en frottant du verre ou une substance résineuse : on les considérait comme différentes et on les appelait électricité voltaïque et électricité statique. Nous savons maintenant que toutes les propriétés d'un courant électrique sont produites par une charge électrique en mouvement, comme on le montre en faisant tourner rapidement un corps chargé. Les courants électriques sont simplement des charges mobiles, tout comme les courants d'eau sont simplement des gouttes mobiles. L'humidité d'une éponge et le liquide d'une rivière sont la même chose, à savoir de l'eau, mais les propriétés que possède une rivière de faire tourner une roue de moulin, d'enlever des parties de la berge... sont des conséquences du mouvement. De la même façon, l'électricité en mouvement produit des effets que l'électricité immobile ne peut pas produire. Nous ne savons pas encore

exactement comment passent les charges électriques le long du fil, ou, en termes scientifiques, nous ignorons le mécanisme de la conduction métallique de l'électricité.

Il existe une très étroite connexion entre l'électricité et le magnétisme. De même qu'il existe deux espèces de charge électrique, de même il y a deux espèces de pôle magnétique. Une extrémité d'un barreau aimanté ordinaire tendra toujours à pointer vers le Nord et l'autre extrémité vers le Sud. Deux pôles pointant vers le Sud ou deux pôles pointant vers le Nord se repoussent ; un pôle pointant vers le Nord et un pôle pointant vers le Sud s'attirent. C'est là simplement une analogie générale entre l'électricité et le magnétisme, et qui ne prouve pas une réelle connexion entre les deux. Mais il existe une action réciproque réelle ; en premier lieu, un courant électrique, c'est-à-dire un déplacement des charges électriques, crée une force magnétique dans son voisinage. C'est là un fait bien connu dont le simple galvanomètre — consistant en une aiguille magnétique suspendue et pouvant pivoter, entourée d'une bobine de fil recevant le courant à mesurer, — constitue un bon exemple. L'intensité de la force magnétique sert à mesurer l'intensité du courant. Un autre exemple connu est l'électro-aimant, dans lequel la force magnétique produite par le courant sert à transformer le noyau de fer en aimant. Mais il n'y a pas qu'une charge électrique mobile qui puisse produire une force magnétique : un pôle magnétique mobile produit pareillement une force électrique qui peut engendrer un courant dans un circuit de fils placé dans le voisinage.

Cette induction électromagnétique, comme on

l'appelle, découverte par Faraday, se retrouve pratiquement dans tous les appareils électriques. Dans une dynamo, un courant électrique est engendré en faisant tourner des bobines de fils dans un champ magnétique, ce qui revient au déplacement d'un aimant vers des bobines fixes. Le champ magnétique variable peut être lui-même produit par une variation de courant qui engendrera, ou *induera* comme l'on dit, un courant variable dans un circuit voisin avec lequel le premier courant n'est pas connecté ; mais il faut bien se rendre compte qu'un courant constant produit une force magnétique constante et ne peut donc pas induire un courant dans un autre circuit voisin. L'induction d'un courant par un autre est utilisée en téléphonie, en télégraphie sans fil et dans des dispositifs électriques sans nombre. Nous admettrons donc la règle générale que tout déplacement de charge électrique crée une force magnétique, et que tout mouvement d'un pôle magnétique crée une force électrique. C'est en donnant à ces idées une forme mathématique idéale et en les étendant des fils conducteurs à l'espace vide où les forces électriques et magnétiques existent en dehors de toute matière, que Clerk Maxwell en vint à la conclusion que si, en tout endroit, nous pouvons produire des oscillations de force électrique (qui doivent, bien entendu, d'après ce que nous avons dit, être accompagnées d'oscillations de force magnétique), ces oscillations produiront des ondes électromagnétiques qui se propageront à travers l'espace vide avec la vitesse de la lumière. Cette conclusion fut, comme on le sait, vérifiée par Heinrich Hertz qui démontra expérimentalement l'existence d'ondes radioélectriques. Tout générateur

d'ondes est simplement un appareil qui oblige des charges électriques à se précipiter en arrière et en avant avec une fréquence donnée d'oscillation dans les fils de l'émetteur, tout comme toute source sonore est un corps matériel vibrant. La charge mobile exerce, pour ainsi dire, son étreinte sur ce que, faute d'un meilleur terme, nous appellerons l'éther de l'espace, et envoie ses ondes à travers cet éther : de même, la corde vibrante ou le diapason sont en contact avec l'air à travers lequel ils envoient leurs ondes sonores. Nous pouvons donner un meilleur exemple des deux cas en faisant agiter par un homme une extrémité d'une longue corde dont l'autre extrémité est fixe : on vérifie l'existence d'une série de bosses ou d'ondes se poursuivant le long de la corde.

Les règles générales qui régissent les charges électriques l'une envers l'autre, et l'interconnexion des forces électriques et magnétiques ne nous disent rien, cependant, de la nature finale de la charge électrique, qui, tout au moins en ce qui concerne ces effets, pourrait ressembler assez à un fluide subtil obéissant à certaines lois mathématiques, le « fluide électrique » dont parlaient les anciens auteurs. Nous savons maintenant que ce terme donne une idée fautive de la question. L'unité naturelle de charge électrique, l'électron, dont la découverte a transformé la physique, nous a été révélée par l'étude du passage de l'électricité, non à travers les fils mais à travers les gaz très atténués d'un tube vide d'air.

Supposons deux tiges de métal scellées à travers les parois et s'avancant à l'intérieur d'un tube en verre : ces tiges peuvent ou non se terminer par des plaques de formes différentes, suivant le but particulier du

tube, mais dans tous les cas, elles sont appelées « électrodes ». Tant que l'air à l'intérieur du tube est à la pression atmosphérique, une différence de potentiel très élevée, par exemple 10.000 volts, peut être appliquée aux électrodes sans qu'il passe d'étincelles. Si, cependant, le tube est vidé d'air, progressivement, il arrive un moment où la décharge électrique se produit, tout d'abord sous forme d'une étincelle épaisse, quasiment velue, puis sous forme de belles incandescences qui ont été soigneusement étudiées mais auxquelles nous ne nous arrêterons pas. Enfin, quand l'air dans le tube a été réduit à environ un dix-millième de sa valeur primitive, le verre du tube brille avec une incandescence verte brillante caractéristique. En introduisant dans le tube de petits écrans de forme différente, il est facile de montrer que cette incandescence est due à quelque chose provenant de l'électrode négative, ou cathode comme on l'appelle, et qui vient frapper les parois de verre. Nous ne pouvons pas voir ce flux cathodique, mais nous en pouvons suivre le mouvement grâce à l'incandescence qu'il produit. Si on approche un aimant, le flux cathodique est dévié, tout comme le serait un courant électrique dans un fil très souple ; en effet, puisqu'ainsi que nous l'avons vu, un courant produit une force magnétique, de même un aimant doit produire une force sur un courant. Une plaque chargée d'électricité dévie également le flux cathodique tout comme si le flux consistait en un certain nombre de petites charges.

Une étude de l'action combinée des forces électrique et magnétique conduit à cette conclusion que le flux cathodique consiste en un essaim de particules *négativement* chargées et, en outre, donne la masse de

chaque particule si nous connaissons sa charge, que nous ne pouvons pas trouver sans nouvelle expérience. Cette expérience, qui sera décrite dans un instant, nous permet de calculer à la fois la charge et la masse. On vérifie que la charge est exactement la même que la plus petite charge que nous puissions trouver associée avec un atome de matière quand nous envoyons à travers un liquide un courant qui pousse les atomes chargés, comme nous le faisons en galvanoplastie, par exemple, opération qui consiste, en fait, à employer une force électrique pour pousser les atomes chargés de métal contenus dans le bain hors de la solution sur l'objet à recouvrir. Aucune expérience n'a jamais conduit à la découverte d'une plus petite charge et, en outre, quel que soit le gaz contenu dans le tube, la charge des particules dans le flux cathodique est toujours la même. Cette unité finale de charge *negative* est appelée l'électron. Sa masse est excessivement faible, même dans un monde d'infiniment petits : elle n'est guère supérieure au deux-millièmes de la masse de l'atome le plus faible et le plus léger, l'atome d'hydrogène. L'électron n'est pas un morceau minuscule de quelque matière portant une charge électrique ; c'est une charge électrique pure et simple, de même que la goutte de pluie est de l'eau. Nous sommes habitués à trouver de l'eau dans les récipients et des charges électriques reposant sur la matière, mais l'électron et la goutte de pluie sont des choses détachées de tout contenant. Quand on dit que la charge électrique a une masse, c'est une autre façon d'exprimer le fait qu'il faut une force pour mettre une charge électrique en mouvement comme on peut le démontrer mathématiquement.

Le flux cathodique dans le tube vide d'air n'est qu'une des façons de produire des électrons en partant de la matière ; il se produit dans le tube le phénomène suivant : les atomes positivement chargés du tube sont projetés contre la cathode par la force électrique appliquée et, sous le choc, les électrons sont chassés de la cathode et des atomes eux-mêmes. Il se produit diverses actions secondaires qui, dans le tube réel, compliquent l'aspect des choses. On peut faire sortir des électrons de tout morceau de métal, en l'échauffant : un tisonnier chauffé au rouge et placé près d'un électroscope le fera se décharger. Le but du filament dans la lampe à trois électrodes est de produire des électrons. Des rayons lumineux ou des rayons X tombant sur une plaque métallique en chasseront les électrons, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent. En résumé, si l'on « maltraite » un atome, en le faisant heurter violemment d'autres atomes, comme nous le faisons en chauffant un corps, ou en le secouant violemment par des variations de force électrique, ou par collision avec un électron mobile, il se produit un dégagement d'électrons. On peut montrer expérimentalement que les électrons produits par une méthode sont les mêmes à tous points de vue que ceux produits par une autre méthode et non, comme on pourrait l'imaginer, qu'une espèce d'électron sort d'un métal et une autre espèce d'un autre métal. Quelle que soit la source, quelle que soit la méthode de production, la même quantité d'électricité constitue cette minuscule unité de charge négative. La petitesse de la charge ne peut être mieux mise en évidence qu'en indiquant que pour porter le courant

qui passe à travers une lampe électrique ordinaire, il faudrait le passage d'un million de millions de millions d'électrons par seconde. Le petit accumulateur ordinaire à 50 ampères-heure emmagasine une charge égale à celle d'un million de millions de millions de millions d'électrons. On voit combien minuscule est l'atome d'électricité.

On n'a jamais trouvé de charge positive *non associée avec la matière*. Quand un électron est chassé d'un atome simple (qui est normalement électriquement neutre), la partie restante de l'atome ayant perdu un peu d'électricité négative, est positivement chargée. La charge positive n'a donc pas le caractère absolu de l'électricité négative en ce sens qu'elle ne peut pas être obtenue sans matière ; l'apparence de ses propriétés caractéristiques est une conséquence d'une perte d'électricité négative, tout comme la nudité est une conséquence naturelle de la perte de vêtements. Alors que nous pouvons isoler les vêtements de l'homme qui les porte, nous ne pouvons pas obtenir, en l'absence d'un homme, l'état de nudité qui résulte de l'absence de ces vêtements. Nous pouvons avoir de l'électricité négative dans un état isolé, mais nous ne pouvons avoir de l'électricité positive que sous forme d'un atome positivement chargé, ou d'un ensemble de tels atomes. Puisque l'atome d'hydrogène est le plus léger de tous les atomes, l'unité la plus légère d'électricité positive que nous puissions avoir est un atome d'hydrogène qui a perdu un électron. Cet atome particulier n'a qu'un électron à perdre, comme on le verra chapitre VII.

Quand des rayons X, par exemple, passent à travers

un gaz tel que l'air, ils détachent les électrons de plusieurs des atomes gazeux et produisent un assemblage d'atomes et d'électrons positivement chargés, les électrons, en général, étant recueillis par d'autres atomes qui ont alors un électron en trop et sont négativement chargés. Les rayons X et d'autres agents tels que des électrons rapidement mobiles ou d'autres particules, créent dans un gaz un essaim d'atomes ou de molécules positivement et négativement chargés, ces particules chargées étant appelées des « ions » ou « ceux qui vont » car elles se déplacent quand une force électrique est appliquée. Or, les particules chargées de tous genres ont une propriété remarquable qu'elles partagent avec les particules de poussière : elles servent de centres de condensation pour l'humidité de l'atmosphère. L'atmosphère peut avoir plus d'humidité qu'elle ne devrait : s'il n'y a rien sur quoi les gouttes minuscules puissent se former, l'air reste clair, bien que sursaturé d'humidité. Mais si des particules de poussière, ou des atomes chargés, ou des électrons sont présents, alors chacun d'eux sert de siège aux gouttelettes d'eau et il se forme un brouillard. La poussière dans l'atmosphère et les ions formés par la lumière ultra-violette dans l'atmosphère supérieure jouent un grand rôle en ce qui concerne les chutes de pluie. Il est très facile de produire en laboratoire un nuage artificiel en envoyant des rayons X à travers de l'air contenant plus que sa charge d'humidité, et ces nuages, sous une forme ou sous une autre, jouent un rôle important dans la physique moderne. En particulier, ils fournissent le moyen de mesurer la charge sur l'électron dont il a été déjà question. La formation d'une goutte autour d'une

particule négativement chargée nous donne le moyen de compter les particules, car la dimension des gouttes minuscules peut être estimée, d'après l'allure, très lente, à laquelle le nuage tombe ¹, et la quantité totale d'eau dans le nuage peut être obtenue par pesée. La charge totale sur le nuage peut être mesurée électriquement. A l'aide d'un dispositif spécial, le nuage peut être formé sur les particules négatives seulement. Il est clair que nous pouvons ainsi obtenir suffisamment de renseignements pour calculer la charge sur une particule négative, c'est-à-dire la charge sur un électron. Plus récemment, Millikan a fait les mesures les plus précises de la charge sur l'électron par observation microscopique de la façon dont se comporte non pas un nuage de gouttelettes, mais une seule gouttelette chargée, d'environ un dix-millième de centimètre de rayon.

La propriété que possèdent les particules chargées de servir de centres de condensation a été utilisée par C. T. R. Wilson comme base d'une des plus ingénieuses et des plus sensationnelles expériences de physique moderne. Quand un atome d'hélium déchargé par un élément radioactif, par exemple l'élément particulier appelé Radium C, se précipite à travers l'air à une vitesse d'environ 20.000 kilomètres à la seconde, il enlève par collision des électrons aux atomes et laisse derrière lui une traînée d'atomes chargés. Sa trajectoire, tout comme la trajectoire

¹ Les nuages célestes sont, bien entendu, soumis à l'action de la pesanteur et tombent tout le temps, mais ils consistent en de si petites gouttes que, par suite de la résistance de l'air, la vitesse de chute est excessivement faible et, en général, ils se transforment en pluie avant d'avoir atteint le sol.

d'une tornade en miniature, est marquée par un sillage de ruines, et notre but est de rendre ce sillage visible. Si l'air, ou tout autre gaz, à travers lequel passent les rayons, est humide (ou contient de la vapeur d'eau saturée, pour employer l'expression plus précise), et est ensuite refroidi par une légère détente, une partie de l'humidité va se déposer et utilisera les atomes ou molécules chargés comme points de départ pour la construction des gouttes, de même qu'une dame peut utiliser de petits bâtons pour enrouler des bouts de laine. Le résultat est que la trajectoire de l'atome rapide, la particule alpha comme on l'appelle, émise par le Radium C, est marquée par une mince ligne blanche de brume qui apparaît sur un fond noir à l'instar d'une ligne tracée par une pointe de craie finement taillée. La ligne consiste en une rangée de gouttelettes minuscules. Des électrons rapides produisent aussi des particules chargées le long de leur trajectoire, en enlevant des électrons aux atomes qu'ils rencontrent, de sorte que leur trajectoire est également rendue visible par cette méthode. Puisque les rayons X projettent également des électrons hors des atomes avec une énergie considérable, comme nous l'avons vu en discutant l'effet photoélectrique, la trajectoire d'un étroit faisceau de rayons X est marquée, non par une simple ligne droite, mais par un enchevêtrement de lignes blanches, chaque ligne étant due à des électrons rapides libérés par les rayons X, chacun produisant sa trace. Ces traces peuvent être photographiées et étudiées à loisir. La durée réelle de passage à travers l'appareil, de l'atome, de l'électron ou du rayon X dont les effets sont ainsi étudiés est à peu près d'un millième de millionième de seconde ;

ce sont les dégâts qu'il laisse derrière lui qui sont enregistrés. Certains des résultats intéressants déduits de la méthode de C. T. R. Wilson sont mentionnés chapitre VII.

L'électricité est donc, tout comme la matière, de structure granulaire : l'atome d'électricité est la minuscule unité d'électricité appelée électron. Tous les phénomènes électriques se rapportent finalement à une question d'électrons, soit individuellement, soit en essaims, mais nous ignorons encore bien des côtés de la question, en particulier en ce qui concerne la façon dont les électrons se comportent à l'intérieur de la matière, bien que nous sachions assez bien comment-ils se comportent à l'état libre. La génération des ondes radioélectriques, par exemple, revient à une migration en masse d'électrons d'abord dans un sens, puis dans l'autre, dix milliers de fois par seconde, dans les fils des antennes. Les électrons sont en quelque sorte de petits manches par lesquels nous exerçons une certaine prise sur l'éther et pouvons l'ébranler de façon à y créer des ondes. Nous ne savons pas, cependant, la façon dont les électrons simples se comportent dans les fils quand un courant y passe, jusqu'où ils vont, ou par quel chemin, parmi les atomes. Actuellement, le fil est pour nous comme un chemin de fer souterrain pour un homme observant une ville d'un ballon : il peut voir un essaim de gens qui entrent dans certaines stations ou qui en sortent, il peut les compter, mais tout ce qui se passe à l'intérieur échappe à son observation.

L'incandescence dans les tubes à décharge tels que la lampe au néon vendue dans le commerce, dépend du passage d'électrons à travers les gaz dont nous

connaissons mieux le processus qu'à travers les métaux. Les rayons X, comme nous l'avons vu, sont engendrés quand les électrons se déplaçant rapidement sont subitement arrêtés par le choc contre des atomes lourds d'une plaque métallique (platine, ou molybdène, ou tungstène) dans un tube vidé d'air : ceci donne à nos manches pour agripper l'éther une secousse subite qui engendre une courte pulsation d'ondes. L'étude de toute caractéristique de la décharge électrique dans les tubes vidés d'air ou des flammes de la lumière de l'arc électrique nous entraîne à la considération de la façon dont se comportent les électrons présents. La libération des électrons par un fil chaud (ou filament) et leur contrôle subséquent par le champ électrique entre ce fil et la « grille » est la fonction essentielle de la lampe à trois électrodes. La libération des électrons dans l'atmosphère supérieure par les radiations du soleil est la cause fondamentale de la couche d'Heaviside, de l'aurore boréale et d'autres phénomènes d'électricité atmosphérique. L'électron est la clef de la physique moderne.

Nous savons qu'un courant passant dans un circuit produit un champ magnétique. Une charge d'électricité en mouvement est la même chose qu'un courant, de sorte qu'un électron se déplaçant sur une orbite crée une force magnétique minuscule et sera équivalent à un minuscule aimant. Les propriétés magnétiques générales de toutes les substances peuvent être expliquées en fonction d'électrons circulant dans le corps de la substance, lesquels sont sensibles au champ magnétique. Les seules substances que l'on considère vulgairement comme douées de propriétés

magnétiques sont le fer et l'acier, mais, en fait, toutes les substances ont des propriétés magnétiques. Les éléments cobalt et nickel possèdent les mêmes propriétés magnétiques que le fer, à un degré moindre, et sont dits ferro-magnétiques. Les autres éléments sont beaucoup moins magnétiques que le fer et il faut des mesures très délicates pour montrer leurs propriétés magnétiques. Dans le cas de certains d'entre eux, les substances dites para-magnétiques, ce faible magnétisme est de la même nature que celui du fer de sorte que, par exemple, un morceau de la substance, une fois exposé à un aimant, essaiera de s'en approcher et de se déplacer à l'endroit où la force magnétique est la plus intense ; mais d'autres, les substances diamagnétiques, ont des propriétés magnétiques opposées en ce sens qu'elles essaient de se déplacer vers l'endroit où le champ magnétique est faible. Elles sont repoussées par le pôle d'un aimant ordinaire, au lieu d'être attirées à la façon du fer.

Les caractéristiques les plus importantes de ces différentes façons de se comporter au point de vue magnétique sont expliquées par la théorie des orbites d'électrons. Il existe encore, cependant, certaines propriétés caractéristiques du magnétisme qui sont demeurées obscures. Une des plus frappantes est que le magnétisme n'est pas une propriété des éléments présents dans un alliage, mais dépend de façon mystérieuse de la manière dont ils agissent l'un sur l'autre une fois juxtaposés à l'état solide. Par exemple, on peut préparer des alliages qui contiennent jusqu'à quatre-vingt-huit pour cent de fer et ne sont pas du tout magnétiques, tandis que l'autres alliages, les bronzes Heusler, qui ne contiennent que des métaux

eux-mêmes faiblement magnétiques, à savoir le manganèse, le cuivre et l'aluminium sont à peu près aussi magnétiques que le fer. Les propriétés caractéristiques importantes des divers aciers spéciaux tels que l'acier chromé préparé de nos jours, ne peuvent pas être calculées d'après les propriétés magnétiques des substances qu'elles contiennent. Le magnétisme ne dépend donc pas en général du genre d'atomes présent, mais de la façon dont ils sont disposés dans une structure cristalline à l'intérieur de la substance — structure cristalline, car chaque métal et alliage consiste en une masse de cristaux minuscules. Il est également vrai que les propriétés magnétiques d'une même substance dépendent notablement de sa structure cristalline qui peut être influencée par le traitement thermique. L'acier au manganèse, par exemple, est dur, ductile et non magnétique s'il est trempé par échauffement et refroidissement dans l'eau froide ; il est dur et magnétique s'il est chauffé et refroidi lentement. Les orbites d'électrons en question doivent prendre leur forme et leur position caractéristiques sous l'influence de forces internes qui régissent la structure cristalline de la substance. Quand on dit que les propriétés magnétiques générales peuvent être expliquées par les orbites d'électrons, on veut dire que la façon dont la température et les autres circonstances affectent les propriétés peuvent être expliquées, mais que nous ne savons pas pourquoi, par exemple, le fer ordinaire doit être si caractéristiquement magnétique : nous savons que cela n'est pas dû à une propriété possédée par des atomes de fer dans toutes conditions, car, outre les faits déjà cités, certains composés chimiques du fer tels que le carbonyle de fer,

ont des propriétés opposées à celles du fer et sont diamagnétiques. Quand nos connaissances seront un peu plus étendues en ce qui concerne les orbites d'électrons dans les solides, et en ce qui concerne la façon dont ils sont influencés par les atomes voisins, nous comprendrons sans doute tout cela. Pour le moment, c'est là un des problèmes les plus étranges de la physique moderne.



Rue du Lombard, 2
LILLE

CHAPITRE VI

Au sujet de la théorie des Quanta

La plupart des plus récentes découvertes de la physique sont consécutives à des recherches concernant les propriétés des radiations qui se déplacent à travers l'espace vide et, en particulier, à leur rapport avec la matière. Les radiations, dont la lumière visible est un exemple, résultent toujours de quelque minuscule perturbation électrique dans la matière, et leur arrivée sur une substance quelconque est toujours suivie d'effets électriques. Parfois, ces effets électriques peuvent être aisément détectés ; c'est le cas, par exemple, des effets d'induction des ondes utilisées en radiotéléphonie, qui sont primitivement électriques avant d'être transformées en son, de l'effet ionisant des rayons X sur les gaz à travers lesquels ils passent, de l'effet photoélectrique de la lumière ultra-violette. Dans d'autres cas, comme dans celui du passage de la lumière à travers le verre ou l'eau, il n'y a pas d'effet électrique aussi évident, bien que l'action d'un champ magnétique sur la lumière pendant son passage montre clairement, ce que d'autres considérations nous auraient laissé prévoir, que des forces électriques sont en jeu. Par l'intermédiaire commun, l'électricité, la façon dont se comporte la radiation est inextrica-

blement mêlée avec les propriétés de la matière, et la théorie des quanta, qui est une théorie de radiation imaginée au début du siècle actuel par le Professeur Max Planck, fait sentir son influence dans toutes les branches de la physique.

Pour étudier cette théorie, il nous faut considérer la question de l'énergie de radiation de plus près que nous ne l'avons fait jusqu'à présent et, en particulier, il nous faut faire la connaissance de ce que les physiciens appellent le « corps noir » qui joue un rôle important dans plusieurs problèmes de radiation. En premier lieu, cependant, il faut signaler que les surfaces qui absorbent bien une radiation rayonneront facilement la même radiation eux-mêmes si elles sont chauffées, tandis que les corps qui n'absorbent pas bien rayonnent très peu eux-mêmes. Par exemple, la suie ou toute surface noire absorbe pratiquement toute radiation qui tombe sur elle, comme c'est le cas pour la lumière visible, tandis que l'étain brillant qui réfléchit si bien, ne peut qu'absorber très peu. Or, si l'on considère deux récipients ayant exactement la même dimension et la même forme, par exemple des bouillottes, l'une de fer recouvert de suie, l'autre d'étain brillant, et si l'on verse de l'eau bouillante dans chacune, l'eau dans la bouillotte recouverte de suie se refroidira beaucoup plus rapidement que l'eau de l'autre bouillotte, car il y a plus d'énergie rayonnée par la surface noire. De même, les meilleures bouteilles isolantes pour conserver chauds ou froids les liquides sont toujours argentées : si la bouteille contient du liquide froid, l'argent réfléchit la radiation qui tombe dessus en venant de l'extérieur, ou, en d'autres termes, absorbe très peu d'énergie rayonnante, tandis que si la

bouteille contient du liquide chaud, l'argent chaud rayonne si mal qu'il y a très peu de chaleur perdue par radiation. Le « corps noir » idéal du physicien est celui qui absorbe complètement toute espèce de radiation tombant sur ce corps et qui doit donc, une fois chauffé, rayonner le plus possible de radiations, en tout cas plus que tout autre corps. Bien entendu, nous ne pouvons pas recouvrir un corps de suie pour faire un « corps noir » de cette espèce car la suie brûlerait quand on chaufferait le corps. Certains oxydes métalliques sont noirs et résistent aussi au chauffage, de sorte qu'on peut les utiliser pour préparer une surface noire, mais la théorie montre que la meilleure façon de réaliser le « corps noir » idéal est de construire un récipient fermé en une matière quelconque résistant à la chaleur — en fer, par exemple, ou, si des températures plus élevées sont nécessaires, en porcelaine spéciale — de chauffer fortement le récipient de l'extérieur, et de laisser la radiation sortir de l'intérieur du récipient par un petit trou. D'une façon générale on peut voir facilement pourquoi on obtient ainsi un « corps noir ». Un absorbant parfait devient un radiateur parfait une fois chauffé. Un petit trou dans un récipient creux, surtout si l'intérieur du récipient est noirci, est un très bon absorbant, car la radiation qui passe à travers le trou se disperse à l'intérieur et n'en ressort jamais. Par exemple, une fenêtre ouverte dans une maison à façade blanche, a l'air d'un rectangle noir parfait lorsqu'il y a du soleil : la lumière du soleil est réfléchie par la paroi blanche qui paraît brillante mais, en passant à travers le trou dans la chambre, se disperse sur chaque objet rencontré et il en ressort très

peu par la fenêtre. Le foyer incandescent d'un four est un radiateur idéal, car c'est pratiquement un petit trou entouré de corps incandescents tous à une température élevée.

Le sens paradoxal du terme « corps noir » apparaît évident quand on considère ce qui se produit quand on chauffe les parois d'un récipient en fer porté au rouge ou même au blanc. Une lumière brillante sort du trou et, cependant, nous appelons cela : « radiation de corps noir. » Le terme « radiation complète » ou « pleine radiation » se comprendrait mieux, mais le terme « radiation de corps noir » est si répandu — et souvent si mal interprété — que ce mot d'explication était nécessaire.

Certaines questions très intéressantes sont soulevées par le problème de la radiation par un radiateur complet ou « corps noir ». Puisque nous avons en un tel corps chaud une source de radiation qui n'a pas de préférence pour une espèce particulière de lumière, rouge, bleue, verte ou invisible, puisqu'elle les absorbe toutes également, nous aimerions savoir comment elle distribue son énergie parmi les différentes longueurs d'onde possibles, car cela nous donnerait une idée nette de la relation entre la matière et la radiation, de même que si nous avons un Ministre des Finances absolument impartial, la façon dont il distribue l'argent aux différents services, l'Armée, la Marine, l'Instruction publique, etc., nous dira la relation entre l'argent et l'Etat ¹. Quand des

¹ L'analogie n'est pas excellente, car tout Ministre des Finances impartial ou non, est un corps noir qui absorbe pleinement toute la radiation, c'est-à-dire l'argent, qui vient vers lui, quelle que soit la façon différente dont il le rayonne ensuite.

expériences sont faites, on vérifie qu'à chaque température particulière le corps chaud émet une série entière de longueurs d'onde, un spectre entier. Quand le corps est très chaud — à blanc — il rayonne suffisamment pour donner chaque type de lumière du spectre visible ; quand il est moyennement chaud, par exemple à la température de l'eau bouillante, il n'émet pas de lumière visible (une bouillotte pleine d'eau bouillante n'est pas visible dans une chambre obscure), mais néanmoins il émet des radiations du genre infra-rouge. C'est là une règle parfaitement simple qui permet de comprendre la nature générale des changements dans la radiation qui se produisent quand le corps est chauffé : plus le corps est chaud, plus les courtes longueurs d'onde prédominent. Ainsi, un tisonnier à la température de l'eau bouillante est invisible dans l'obscurité : toute sa radiation se trouve dans l'infra-rouge. Quand il est chauffé, la limite de la radiation se déplace vers le rouge jusqu'à ce qu'à ce qu'à environ 500 degrés C. une lumière rouge visible apparaisse alors que le tisonnier commence à être chauffé au rouge. Lorsqu'on le chauffe davantage encore, des rayons plus visibles s'ajoutent au spectre de la radiation et le tisonnier semble orange puis jaune ; finalement il s'introduit un peu de bleu, et le tisonnier devient blanc. Pendant tout ce temps, la majeure partie de l'énergie se trouve dans l'infra-rouge, mais la place d'énergie maximum tend à s'approcher du spectre visible. Un tisonnier n'est pas à proprement parler un « corps noir », mais se comporte de façon assez analogue pour les besoins de notre exemple. Un corps aussi chaud que le soleil émet la plupart de son énergie rayonnante en un point du spectre

visible : un corps excessivement plus chaud l'émettrait dans le bleu, et même dans l'ultra-violet s'il était encore plus chaud.

Des mesures soigneuses faites en laboratoire avec des radiateurs complets montrent exactement quelle quantité d'énergie rayonnante de chaque longueur d'onde est émise à des températures différentes : pour une température déterminée, elles fournissent une sorte de recensement du nombre d'unités d'énergie de longueur d'onde donnée, tout comme un recensement de la population fournit, pour tout pays, le nombre d'habitants pour chaque âge donné : les pays différents, où la distribution est différente, correspondent aux températures différentes. Or, avant que fût imaginée la théorie des quanta, on n'avait aucune idée des unités naturelles d'énergie rayonnante ; on supposait que l'on peut isoler toute quantité d'énergie, aussi faible que l'on veut, rayonnée par un corps chaud ou un atome lumineux. On a pu montrer mathématiquement que, s'il en était ainsi, il faudrait s'attendre à voir un corps chaud rayonner toute son énergie dans le violet et dans l'ultra-violet ; or, nous savons qu'il n'en est rien. Aucune théorie basée sur les anciennes idées ne fournissait une explication convenable de la radiation du corps noir « impartial » qui était devenu à la fin du siècle passé, le dada des physiciens.

Le problème fut résolu la première année du siècle actuel, quand Planck montra que pour obtenir le résultat voulu, il fallait faire une hypothèse révolutionnaire, à savoir que l'énergie rayonnante est émise par paquets, pour ainsi dire, d'unités ou d'atomes d'énergie, de même que la matière existe sous forme

d'atomes. Nous ne pouvons pas avoir moins d'un atome de plomb, par exemple ; tout morceau de plomb minuscule consiste en un nombre entier d'atomes. Nous ne pouvons pas avoir une charge électrique de moins d'un électron. De la même façon, nous ne pouvons avoir moins d'une unité ou quantum, comme on l'appelle, d'énergie rayonnante, et tout corps qui émet ou absorbe de la radiation le fait suivant un nombre déterminé de quanta. L'énergie rayonnante se débite en grains et non en quantités infiniment divisibles.

La petite parcelle de lumière d'une certaine longueur d'onde, par laquelle de l'énergie rayonnante est fournie, est parfois appelée photon. Le photon est simplement un quantum d'énergie rayonnante, tandis que le terme quantum est un terme plus général qui s'applique à toute autre chose que la lumière, par exemple, aux vibrations des atomes entiers et des molécules.

Le quantum d'énergie rayonnante diffère notablement du quantum d'électricité, l'électron. La quantité de charge est la même dans tous les électrons : il n'y a qu'une unité. Cette unité d'énergie rayonnante, cependant, est différente pour chaque espèce — c'est-à-dire pour chaque longueur d'onde — de radiation. Elle est, en fait, proportionnelle à la fréquence, de sorte que le quantum d'énergie de la radiation rouge visible extrême n'est que la moitié de celui de la radiation violette visible extrême qui, comme nous l'avons vu, a une fréquence double. Le quantum d'une radiation X est beaucoup plus grand que le quantum de toute radiation visible. C'est exactement comme si nous ne pouvions acheter des objets qu'en

quantités limitées, mais la quantité minimum variant suivant les objets : un sou de cerises, un franc de pêches, un louis de bagues en or, une dizaine de louis de diamants. L'unité de prix, qui augmente lorsque la taille de l'objet diminue, correspond à l'énergie rayonnante qui augmente lorsque la longueur d'onde diminue.

La lumière, ou la radiation en général, a donc une propriété de « paquet » ainsi qu'une propriété d'onde, et c'est là un des paradoxes de la physique moderne. Newton concevait la lumière comme un courant de particules auxquelles il prêtait des propriétés pulsatoires afin d'essayer d'expliquer certains phénomènes que nous pouvons expliquer facilement maintenant à l'aide de la théorie ondulatoire. Si la lumière blanche contenait des particules de toutes les dimensions correspondant à toutes les différentes couleurs (ou longueurs d'onde comme nous disons maintenant) qu'elle contient, il serait relativement facile d'imaginer que la quantité d'énergie dans chaque particule dépend de sa dimension, et le quantum, ou nature atomique de l'énergie en serait une conséquence naturelle. Pour expliquer ce que nous observons aujourd'hui, cependant, il nous faut supposer que la lumière se comporte dans certaines conditions comme un courant de particules, dont chacune a une énergie déterminée, et dans d'autres conditions décrites chapitre IV comme un mouvement ondulatoire. Tout ce que nous pouvons alléguer comme excuse est que nous savons par expérience quand il nous faut traiter la lumière comme mouvement ondulatoire pour obtenir les résultats voulus, et quand il nous faut la traiter comme quantum, de même que le baromètre

nous dit quand il faut prendre un parapluie ou mettre un chapeau de paille. Il vaudrait mieux pouvoir adopter une ligne uniforme de conduite, mais cela n'est pas possible en général, bien qu'actuellement il y ait à l'étude un nouveau système dans lequel toute la matière a des propriétés d'onde et grâce auquel toutes les propriétés d'onde et de quantum de la radiation sont conciliées. La nouvelle théorie, appelée la méthode de « mécanique des ondes » sera à nouveau mentionnée chapitre VII.

Si la question de la radiation de « corps noir » qui a conduit à la théorie des quanta était la seule occasion de cette théorie, celle-ci pourrait être laissée à l'arrière-plan et utilisée seulement dans des occasions spéciales. Mais il existe une série entière d'observations importantes dans différentes branches de la physique qui semblent découler naturellement de la théorie des quanta. Considérons tout d'abord l'effet photoélectrique. Nous avons vu que lorsque la lumière ou toute radiation de courte longueur d'onde tombe sur un métal, des électrons sont projetés dont le nombre dépend de l'intensité lumineuse, et la *vitesse* du genre de lumière. Si la radiation est faite de paquets d'énergie, et si l'énergie peut être dépensée à chasser les électrons, nous pouvons nous attendre à ce que chaque atome de lumière ou bien projette un électron avec une vitesse définie, ou bien ne fasse rien, mais en tout cas n'expulse pas un électron avec une vitesse moindre. D'après la théorie des quanta, une courte longueur d'onde — c'est-à-dire une radiation à haute fréquence — devra donc projeter des électrons de vitesse beaucoup plus grande que celle de ceux éjectés par une radiation de grande longueur d'onde. C'est

bien là ce que l'on observe : la lumière rouge n'éjecte pas d'électrons, la lumière violette les projette avec une faible vitesse, la lumière ultra-violette donne une plus grande vitesse et les rayons X projettent des électrons très rapides. La lumière rouge, dont les quanta sont très petits à cause de sa faible fréquence, n'a pas d'effet car une certaine énergie minimum est nécessaire pour expulser un électron d'un atome ; l'énergie des quanta rouges est moindre que ce minimum. Si l'on tient compte de la faible énergie strictement nécessaire pour libérer l'électron, l'énergie que l'électron acquiert est exactement proportionnelle à la fréquence de la radiation ; on peut d'ailleurs le montrer expérimentalement. Ceci est maintenant si bien établi que, dans les cas où il est difficile de mesurer la fréquence d'ondes ultra-violettes très courtes par les moyens ordinaires, l'énergie des électrons qu'elles éjectent de la matière a été déterminée et utilisée comme mesure de longueur d'onde. La même méthode a été appliquée aux rayons gamma du radium de fréquence extrêmement élevée.

La théorie des quanta est appliquée, non seulement à la radiation, mais à tout processus atomique ayant des propriétés périodiques, ou, en d'autres termes, qui se répète avec une fréquence d'un certain nombre de périodes par seconde. La rotation d'un atome ou d'une molécule autour d'un axe, comme celle d'une toupie, est une propriété périodique. D'après la théorie des quanta, un corps en état de rotation ne peut tourner qu'à certaines vitesses et, en particulier, ne peut pas tourner très lentement : ou bien il ne tourne pas du tout, ou bien il doit tourner à la première vitesse permise ; de même, si nous ne deman-

dions à une horloge que d'indiquer douze heures au milieu du jour, il suffirait de l'arrêter à cette heure, ou bien l'aiguille des heures pourrait tourner une fois, deux fois ou trois fois ou tout autre nombre entier de fois en vingt-quatre heures, mais pas à une vitesse intermédiaire. La conséquence de cette loi restrictive extraordinaire est que, si nous avons un gaz à basse température où les molécules s'entre-choquent relativement doucement, ce n'est qu'exceptionnellement qu'une d'entre elles tournera, les chocs n'étant pas en général suffisants pour donner à la molécule la rotation la plus lente permise. Il en résulte que pour élever la température du gaz, nous n'avons pas à fournir beaucoup plus que l'énergie nécessaire pour obtenir que les molécules se déplacent plus vigoureusement. Aux températures plus élevées, cependant, quand le mouvement est plus vigoureux, les collisions sont suffisamment fortes pour faire tourner la plupart des molécules à la vitesse minima permise par la théorie des quanta et, par suite, il nous faut fournir de l'énergie, non seulement pour faire en sorte que les molécules se hâtent sur leurs trajectoires, mais aussi pour les faire tourner. Ceci semblerait indiquer qu'il faut moins de chaleur pour élever la température d'un gaz d'un degré s'il est froid que pour l'élever de la même quantité, s'il est chaud. Or, l'expérience montre qu'il en est bien ainsi.

Cet effet est encore plus prononcé avec les corps solides. Le résultat de deux méthodes différentes de calcul qui appliquent la théorie des quanta aux vibrations d'un solide est le même ; à savoir que la chaleur nécessaire pour chauffer un corps quand il est très froid est à peu près nulle en comparaison de celle

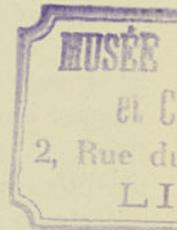
nécessaire pour faire monter sa température de la même quantité quand il est chaud. Ceci concorde bien avec les expériences concluantes mentionnées chapitre II et qui ont montré qu'en réalité la quantité de chaleur qui élève une livre de cuivre d'un degré, par exemple, quand le cuivre est à la température ordinaire de la salle, sera suffisante pour faire monter de 20 degrés la température de cette même livre de cuivre si nous partons de 250° C. au-dessous du zéro. La concordance entre les faits observés et les prévisions de la théorie des quanta est très nette quand on étudie en détail les conséquences de cette théorie.

Chaque fois qu'il s'agit d'oscillations atomiques ou moléculaires de toute nature, la théorie des quanta est applicable. Dans l'atome, nous avons des électrons qui suivent des orbites se répétant elles-mêmes avec certaines fréquences définies : comme nous le verrons dans le chapitre suivant, la théorie des quanta explique le genre de lumière émise. Dans les gaz les molécules tournent en même temps qu'elles se déplacent de-ci de-là : la théorie des quanta explique non seulement la façon dont les atomes se comportent sous l'influence de la chaleur, mais aussi de la lumière. Les rotations, ou oscillations, des corps visibles ordinaires — toupies, volants et projectiles — ne sont pas, cependant, affectées par la théorie des quanta, puisqu'il ne s'agit plus ici d'atomes simples, pas plus que la théorie atomique n'apparaît lorsqu'il s'agit du poids de ces corps. Le poids ne peut varier que par échelons, puisque nous ne pouvons pas avoir un poids plus petit que celui d'un atome, mais ces échelons sont beaucoup trop petits pour être visibles quand il s'agit de corps composés de millions de

millions de millions de millions d'atomes, et il nous semble que nous sommes en mesure de pouvoir changer le poids à volonté de manière continue. De même, les rotations de quanta sont beaucoup trop faibles pour qu'on puisse les rencontrer dans les problèmes de génie civil, car, sinon, on les aurait détectées depuis longtemps déjà.

La théorie des quanta est caractéristique de la physique moderne, en ce sens que c'est un exemple de mécanique spéciale appliquée aux processus atomiques. Dans la physique du siècle passé, appelée maintenant « physique classique », les atomes étaient toujours considérés comme des corps minuscules obéissant aux lois ordinaires de la mécanique qui régissent les objets de dimensions ordinaires, ou objets macroscopiques comme on les appelle souvent, par contraste avec les objets microscopiques ou sous-microscopiques. Les radiations étaient supposées être des ondes dans un milieu spécial subtil, l'éther, mais leurs propriétés étaient déduites d'analogies tirées de la façon dont se comportent les ondes et les vibrations qui peuvent être vues ou détectées dans des milieux réels tels que l'air, l'eau ou les solides. Aujourd'hui, les résultats de nos expériences nous ont amenés à la conclusion que les lois de déplacement des atomes et de leurs parties, et les règles concernant les radiations qu'ils émettent et absorbent, sont à plusieurs points de vue d'un genre spécial qui ne peut être découvert que par essais et comparaisons répétées avec les phénomènes eux-mêmes. Il n'y avait pas de raison, après tout, de supposer que les parties d'un atome dussent obéir aux mêmes règles de mécanique que les pièces d'une machine, ou les parties d'un système solaire, de

même qu'il n'y a pas lieu de croire que la psychologie d'une foule réfléchisse celle des individus composant la foule. Bien entendu, il doit être possible finalement de déduire la façon dont se comporte la matière en bloc de la façon dont se comportent les atomes individuels, une fois que nous connaissons leurs lois ; il doit être également possible de déduire la façon dont se comporte la radiation en bloc des propriétés des paquets ou quanta de radiation, bien que nous ayons trouvé impossible la déduction inverse, c'est-à-dire la déduction de la façon dont se comportent individuellement les unités minuscules d'après celle de l'ensemble. Actuellement, cependant, il est plus simple de se rappeler que la matière en blocs pouvant être pesés et les radiations telles qu'on les détecte ordinairement, obéissent aux « lois classiques » de la mécanique, l'électricité et l'optique, tandis que pour tout ce qui concerne les atomes simples et leurs petits paquets de radiation, des lois spéciales interviennent dont la théorie des quanta résume certaines des plus importantes.



CHAPITRE VII

Au sujet de l'Atome

Maintenant que nous avons jeté un rapide coup d'œil sur la question de la matière et examiné certains résultats du travail intense de ces trente dernières années, nous en arrivons à parler de l'atome qui constitue de par lui-même l'épitomé de ce travail. Pour considérer la nature de la chaleur, il suffirait, pour notre étude, de traiter les atomes et les molécules comme de petites unités de matière en état de perpétuelle agitation. S'il s'agit de la la génération de la lumière et de la radiation en général, il nous faut, par contre, aller plus loin et étudier la structure de l'atome lui-même, qui intervient souvent dans les considérations modernes de l'électricité. Dans la chimie d'autrefois, les atomes étaient considérés comme de petites particules incassables douées de certaines forces d'attraction chimique ou « affinités » : aujourd'hui, la théorie chimique trouve de plus en plus son expression en fonction de la structure détaillée de l'atome et, en particulier, des forces électriques dont la nature est fixée par cette structure. Même dans l'étude de la chaleur, certains détails nous obligent à cesser de considérer l'atome ou la molécule comme une particule simple et à faire appel aux

notions récentes de structure atomique. Plus l'étude de cette structure est poussée, plus vaste devient le champ de ses applications, et plus la chimie et la physique tendent à devenir deux branches très voisines d'une même science.

Jusqu'à la fin du dix-neuvième siècle, on admettait que la matière consistait en atomes, mais qu'à chaque élément correspondait un genre différent d'atome qui n'avait rien de commun avec l'atome de tout autre élément. Tous les atomes étaient supposés incassables, indestructibles et de structure homogène tout comme une gelée, et non composites comme un pudding aux raisins. Le Professeur Clerk Maxwell, le plus grand théoricien en physique de ce temps, les appelait des « articles fabriqués », car, dans son esprit, les atomes, après leur formation, se maintenaient intacts et sans changement dans la suite des temps. Il est vrai que plus d'un siècle auparavant, le chimiste Prout avait suggéré que tous les atomes pouvaient être des structures faites d'atomes d'hydrogène, mais cette supposition avait été rejetée car des mesures précises de poids atomiques comparatifs avaient montré que les poids des différents atomes n'étaient pas un nombre entier de fois le poids de l'atome d'hydrogène ; le chlore, par exemple, a un poids atomique de 35,46 et non exactement 35 ou 36 comme la théorie de Prout le laisserait supposer, le poids de l'atome d'hydrogène étant 1.

L'idée que l'atome pouvait être formé de parties composantes prit naissance vers le début du siècle présent, quand l'existence de l'électron fut nettement établie, car des électrons identiques peuvent être obtenus de toutes sortes de matières comme nous le

montrons au chapitre V, et ils sont tellement plus légers que les atomes que plusieurs d'entre eux peuvent être contenus dans un atome sans affecter suffisamment le poids pour être détectés. Il restait à savoir où est localisée l'électricité positive dans l'atome, et à déterminer ce qui donne du poids à l'atome, car un atome devrait contenir des milliers d'électrons si c'étaient ces derniers qui lui donnent son poids total. C'est à ces questions qu'en 1911 Lord Rutherford répondit d'une façon générale, et les études qui suivirent n'ont fait que confirmer et étendre ses conclusions.

Lord Rutherford arriva à la conception moderne de l'atome en étudiant le passage des particules alpha à travers de très minces feuilles de métal. Ces particules alpha sont des atomes positivement chargés d'hélium qui sont émis spontanément par certains éléments radioactifs : les particules qui viennent de n'importe quel genre d'élément ont toutes, *grosso modo*, la même vitesse, environ vingt mille kilomètres par seconde et, à cause de cette vitesse, une énergie très intense¹, beaucoup plus grande que celle que nous pouvons donner aux atomes en laboratoire par n'importe quelle disposition des tensions électriques dont nous disposons. La nature nous pourvoit ainsi d'une rafale de projectiles atomiques minuscules avec lesquels nous pouvons vérifier les propriétés de la matière. Les expériences de

¹ Il est vrai qu'une particule simple n'a qu'une énergie de dix millions de millionième de kilogrammètre environ, mais ceci signifie néanmoins qu'un gramme de particules alpha aurait une énergie plus de dix mille millions de kilogrammètres, énergie qui est de beaucoup supérieure à l'énergie des projectiles de la bordée d'un cuirassé moderne.

Rutherford avaient pour but de vérifier comment ces particules rapides sont dispersées par les atomes mis sur leur chemin. Il constata que si la plupart d'entre elles ne sont que peu déviées de leur trajectoire primitive par une feuille d'or, ou toute autre feuille métallique, cependant, occasionnellement, une particule peut être déviée d'un très grand angle au point que même dans les cas extrêmes, elle sort de la feuille du même côté que celui par où elle est entrée.

Pour mieux comprendre les conséquences à déduire de ce fait, supposons un tireur qui perce une paroi de bois à l'aide de balles de fusil. Les balles seront quelque peu déviées de leur trajectoire par les irrégularités du bois mais n'en continueront pas moins dans leur direction primitive. Mais si le tireur constate qu'occasionnellement une balle est déviée d'un angle de cinquante ou soixante degrés par exemple, et que même, de temps en temps, il y en ait une qui revienne vers lui, il lui faut conclure que la paroi de bois contient de petits morceaux de fer ou d'une matière analogue qui sont frappés plus ou moins directement, de temps en temps, et font ricocher les projectiles. De la même manière, Rutherford a conclu que ses expériences montraient que les atomes doivent contenir de petits centres impénétrables capables de faire dévier d'un grand angle les particules rapides. Le calcul a montré que chaque particule alpha doit passer à travers des centaines d'atomes en traversant la feuille d'or, de sorte que la petite déviation de la particule moyenne doit simplement être le résultat d'un certain nombre de perturbations minuscules, mais le calcul montre également qu'il est au-delà de toute probabilité que les très grandes déviations

puissent être le fait d'aussi petites poussées qui, par hasard, se produiraient toutes dans la même direction. Dans les expériences de cette nature, les raisonnements généraux sont loin de suffire ; tout doit être contrôlé avec une évaluation mathématique précise de la valeur de l'effet à attendre, et par comparaison avec les quantités mesurées dans l'expérience.

La concordance des résultats de Rutherford avec les calculs faits dans l'hypothèse que les atomes contiennent des noyaux répulsifs qui dévient toute particule alpha venant les frapper ou s'en rapprochent, était suffisante pour convaincre le monde scientifique de la vérité de sa conception de la structure atomique. Ses expériences furent faites en plaçant sur la trajectoire des particules alpha qui avaient passé à travers la feuille d'or, un petit écran de substance phosphorescente : quand une particule frappe cette substance, son énergie est suffisante pour produire une minuscule scintillation de la lumière, que l'on peut observer au microscope. Par cette méthode, seule la position d'arrivée de la particule est enregistrée, mais non sa trajectoire entière. Heureusement, C. T. R. Wilson nous a donné une méthode, décrite chapitre V, pour enregistrer la trajectoire d'une particule alpha à travers un gaz, en déposant de petites gouttes d'humidité sur les atomes qu'elle dérange sur sa trajectoire. Les photographies des trajectoires de particules alpha montrent que si la plupart ne sont que légèrement déviées, de temps en temps on en trouve une fortement déviée de sa trajectoire tandis qu'une autre trace se dégage, de sorte que la trajectoire semble se diviser en deux branches. Une de ces branches est la trajectoire de la particule elle-même,

déviée en frappant le noyau d'un atome du gaz ; l'autre, est la trajectoire du noyau qui reçoit un choc si violent qu'il se précipite à travers le gaz en produisant sur son passage un effet semblable à celui de la particule elle-même. Le nombre de branches dans un nombre donné de trajectoires, et les angles des branches concordent bien avec les résultats de la théorie de Rutherford. Nous pouvons donc, de cette façon, photographier les trajectoires et les collisions de particules si petites qu'un million de millions d'entre elles, côte à côte, ne s'étendraient que sur une fraction de centimètre, et si légères qu'un million de millions de millions d'entre elles ne peseraient pas autant qu'un grain de poussière. Nous les détectons en utilisant leurs effets électriques.

Les différentes expériences montrent donc qu'à l'intérieur de l'atome il doit exister quelque centre minuscule de force, relativement massif pour ne pas être bousculé par la particule en mouvement : un noyau dans la prune atomique. Ce n'est peut-être pas là une très bonne comparaison car le noyau atomique ou noyau tout court, comme on l'appelle, a un diamètre qui n'est qu'environ le dix-millième de celui de l'atome, mais il a pratiquement toute la masse de l'atome. Le noyau est positivement chargé, de sorte qu'il neutralise électriquement les électrons négativement chargés qui composent le reste de l'atome. C'est en vertu de sa charge élevée d'électricité positive que le noyau peut faire dévier d'un grand angle la très rapide particule alpha. Comme sa charge est de nature opposée à l'électricité des électrons, elle les attire mais ils ne tombent pas dessus, pas plus que les planètes ne tombent sur le soleil qui les attire : dans les deux cas,

le mouvement du corps le plus léger autour du corps central plus massif crée une tendance à la fuite vers l'extérieur qui contre-balance exactement l'attraction. L'atome est, en fait, une sorte de système solaire, avec l'exception que, tandis que les planètes qui circulent autour du soleil sont toutes à peu près dans un même plan, les orbites des électrons qui circulent autour du noyau sont, dans un atome lourd, où il y en a beaucoup, dans des plans qui se trouvent dans plusieurs directions différentes.

Avant de continuer, examinons l'aspect général d'un atome. Au centre, nous avons un noyau qui, agrandi un million de millions de fois, aurait à peu près la dimension d'un pois. Il ne faut pas le considérer, bien entendu, comme un corps déterminé ressemblant à un petit pois, mais plutôt comme un centre de force électrique influençant l'espace environnant. En parlant de dimension, nous voulons dire que, si nous approchons de l'extérieur, de ce que nous appellerons la limite (qui tient la place de la surface de l'atome), la force devient subitement très grande. Dans le cas d'un feu très violent, personne ne peut s'approcher plus près qu'une certaine distance, et il y a là une limite en quelque sorte bien qu'il n'existe pas de mur réel. C'est dans ce sens que nous parlons de limite et de dimension pour le noyau. Autour de ce noyau s'agit un essaim d'électrons qui se déplacent sur des orbites, certains plus près, d'autres plus loin, leur nombre et leur disposition dépendant du genre d'atome. Dans le cas des atomes les plus lourds, il y en a environ quatre-vingt-dix. Les électrons occupent un espace qui, une fois agrandi comme le noyau un million de millions de fois, se répartirait sur une

distance de cent mètres environ. Ils occupent cet espace, non comme l'eau occupe un réservoir, mais dans le sens qu'ils y patrouillent tout comme des sentinelles. Il empêchent la patrouille d'électrons d'autres atomes d'y entrer et cette sphère patrouillée est appelée dimension d'un atome puisque deux atomes amenés au contact par suite de collisions ordinaires se sépareront brusquement l'un de l'autre dès que ces espaces occupés se toucheront. Quand, cependant, une particule très énergique telle qu'une particule alpha ou un électron rapide rencontre un atome, elle peut franchir cette patrouille d'électrons que nous appelons ordinairement atome, en ne subissant que quelques petites déviations lorsqu'elle passe très près d'un électron. Dans le cas ordinaire, le noyau étant si petit, la particule passera droit à travers l'atome sans grande difficulté, mais si par hasard, comme cela se produit de temps en temps, elle passe près du noyau massif et puissant, elle s'en détournera comme d'une puissante forteresse. L'atome est donc surtout un espace vide et ce qui n'est pas espace vide est composé de centres de force électrique et probablement magnétique — un très fort centre de force au milieu, et des centres plus faibles de forces directement opposées se déplaçant dans les parties extérieures.

Si l'une des feuilles d'or minces de l'expérience de Rutherford était agrandie jusqu'à avoir une épaisseur d'un kilomètre, les atomes occuperaient un espace d'environ un mètre, se touchant pratiquement l'un l'autre, mais le noyau au centre de chaque atome aurait à peu près la dimension d'un petit grain de poussière, un deux millième de centimètre environ.

Une particule alpha, à peu près de la même dimension, sur son chemin à travers cette couche si peu dense en noyaux, devrait passer à moins de deux millièmes de centimètre d'un noyau pour être déviée de quarante-cinq degrés, de sorte que l'on conçoit aisément que seule une particule occasionnelle est déviée d'un grand angle. C'est, cependant, l'existence de ces particules occasionnelles qui fournit la clef du mystère atomique.

Le nombre et la disposition générale des électrons dans les parties extérieures de l'atome à son état normal dépendent de la dimension de la charge positive dans le noyau. L'action chimique entre atomes doit être la conséquence des forces électriques dans les parties extérieures de l'atome, forces qui ne sont pas les mêmes dans toutes les directions, mais sont particulières à l'espèce d'atome, à cause de la disposition des orbites des électrons qui ont certaines directions connues. Nous pouvons donc dire que la dimension de la charge sur le noyau fixe les propriétés chimiques du genre d'atome en question.

Nous avons eu souvent l'occasion de parler de la masse des atomes. Jusqu'à ces derniers temps, elle ne pouvait être calculée que par des moyens chimiques. Dans certains composés, deux éléments différents se combinent, dans les proportions d'un atome de l'un à l'atome de l'autre, de sorte qu'en pesant dans une balance délicate les quantités qui se combinent réellement, nous pouvons trouver la relation du poids d'une espèce d'atome au poids de l'autre espèce. Connaissant le poids d'un atome d'un élément, l'hydrogène par exemple, qui peut être estimé par des méthodes spéciales examinées lors de la discussion du mouve-

ment Brownien, chapitre II, les poids de tous les autres atomes peuvent être trouvés en étudiant des composés chimiques appropriés, et ces poids sont les poids atomiques donnés dans tous les livres de chimie. Un atome est pris comme étalon ; pour des raisons spéciales, c'est celui d'oxygène dont le poids est désigné par le chiffre 16, et les poids des autres sont donnés en comparaison.

Il importe de faire remarquer, cependant, que les quantités que nous pesons réellement consistent en millions de millions de millions de millions d'atomes, de sorte que ce que nous trouvons réellement est un poids atomique *moyen*. Bien entendu, si tous les atomes doués des mêmes propriétés chimiques pesaient le même poids, comme il avait été tacitement supposé jusqu'à ces derniers temps, la moyenne nous donnerait les mêmes résultats qu'une pesée individuelle. Si nous avions deux sacs contenant, l'un, un million de sous, et l'autre, un million de francs, en pesant les sacs, nous obtiendrions les poids relatifs du sou et du franc, en supposant que tous les sous et tous les francs pèsent le même poids. Si, cependant, les francs frappés en des années différentes différaient de poids, bien qu'ils aient tous le même pouvoir d'achat (ce qui correspond à la propriété chimique de nos atomes), nous n'aurions trouvé que la valeur *moyenne* du franc en fonction de celle du sou.

Or, une des plus importantes séries de recherches effectuées depuis la guerre est celle par laquelle Dr. F. W. Aston a trouvé possible de déterminer les masses des atomes individuels. En discutant la question de l'électron, nous avons déjà signalé qu'un courant de particules chargées dans un tube à vide

équivalait à un courant et est dévié de sa course par une force magnétique ou une force électrique. La force sur l'une des particules dépend de la charge : la déviation que la force produit dépend de la masse et de la vitesse de déplacement de la particule, de même que si une balle est lancée avec un vent de travers, la quantité dont elle dévie dépend de la masse de la balle et de sa vitesse (en supposant, pour que la force produite par le vent soit la même, que les balles aient la même dimension dans tous les cas). Une balle de golf est évidemment moins sensible au vent qu'une balle de ping-pong, et une balle rapide moins qu'une balle lente. Il est facile de produire un vol d'atomes chargés dans un tube vide d'air, soit en introduisant le genre d'atomes voulu sous la forme de traces de gaz restant dans le tube, soit en les plaçant sous forme de composé solide sur l'électrode positive. En employant un dispositif spécial de forces électriques et magnétiques qui correspond à deux genres différents de vent soufflant sur notre balle, et en connaissant la charge sur l'atome mobile, qui peut être déduite d'autres considérations, la masse de l'atome peut être calculée d'après la quantité dont elle est déviée de sa trajectoire originelle. Cette quantité peut être observée, car, heureusement, les atomes mobiles laissent leur trace sur une plaque photographique dressée comme une cible. S'il coexiste des atomes de deux masses différentes, leurs trajectoires seront séparées tout comme celles de la balle de golf et de la balle de ping-pong dans le vent.

L'appareil d'Aston est, dans un sens, une sorte de balance électro-magnétique pour séparer les atomes d'après leur poids et pour les déposer à l'endroit

approprié. Grâce à cet appareil, Aston a vérifié un fait étonnant que l'on soupçonnait seulement, juste avant la guerre, mais sans se douter de sa généralité, à savoir que la majorité des éléments chimiques ne consistent pas en atomes identiques mais en un mélange d'atomes qui, bien qu'ayant les mêmes propriétés chimiques, ont des masses différentes. Ainsi, le chlore, avec son poids atomique de 35,46 contient des atomes de poids 35 et d'autres de poids 37, les proportions étant telles qu'elles donnent le poids atomique fractionnel 35,46. D'autres éléments contiennent des atomes de beaucoup plus de deux poids différents ; par exemple, le mercure, de poids atomique 200,6 est un mélange d'atomes de poids 202, 200, 199, 198, 201 et 204, par ordre d'importance. Cette découverte peut être résumée en disant que la plupart des éléments chimiques sont des mélanges d'isotopes, les isotopes ¹ étant les atomes qui ont les mêmes propriétés chimiques mais des poids atomiques différents.

La découverte des isotopes apporte une grande simplification dans l'étude de la structure atomique car, comme le montrent les exemples donnés, quand on tient compte des isotopes eux-mêmes, tous les poids atomiques sont très voisins de nombres entiers ; les fractions qui apparaissent quand on étudie les éléments chimiques ordinaires sont dues surtout à ce que ces éléments sont des mélanges. Il semble donc que la partie lourde de tous les atomes d'espèce diffé-

¹ Isotope est dérivé du mot grec signifiant « la même place », c'est-à-dire, dans le tableau périodique, une place à laquelle correspondent des propriétés chimiques définies.

rente soit construite de parties simples d'une espèce, à savoir le noyau de l'atome d'hydrogène¹. Nous arrivons ainsi à la conclusion que le noyau d'un atome d'hydrogène, qui est une particule avec une charge positive de même grandeur que la charge négative sur l'électron, est d'importance spéciale pour la structure atomique ; il a reçu le nom spécial de *proton*. L'atome d'hélium pèse quatre fois plus que l'atome d'hydrogène et son noyau contient quatre protons : le noyau d'un type d'atome de chlore contient 35 protons, celui de l'autre type contient 37, et ainsi de suite. Il faut spécialement remarquer que l'électricité positive ne se rencontre jamais seule, à l'inverse de l'électricité négative, mais que, même sous sa forme la plus simple, elle est associée avec de la matière.

Approfondissons un peu la question. Si le noyau consistait seulement en protons, un atome pesant 35 fois plus qu'un atome d'hydrogène aurait une charge de 35 unités et aurait 35 électrons dans le corps de l'atome lui-même. On a trouvé, cependant, qu'en général la charge nucléaire d'électricité positive est beaucoup moindre que le poids atomique de l'atome en question. Par exemple, les deux atomes de chlore, de poids 35 et 37 respectivement, ont une charge nucléaire de 17. Ceci s'explique facilement si le noyau contient, intimement associés avec ses protons, des électrons propres tout à fait distincts de ces électrons extra-nucléaires, comme nous pouvons les appeler,

² Le noyau de l'atome d'hydrogène pèse en fait un peu plus que l'unité qui apparaît dans les noyaux plus lourds, mais il y a à cela une raison un peu trop compliquée pour que nous la considérions ici.

qui circulent tout autour comme les planètes autour du soleil. L'électron a une masse qui n'est qu'environ le deux millièmes de celle d'un proton, de sorte que leur présence n'affecte pas sensiblement le poids du noyau. Nous voyons maintenant l'explication de l'existence des isotopes. La charge positive sur le noyau fixe, comme nous l'avons vu, les propriétés chimiques de l'atome, de sorte que tous les isotopes d'un élément doivent avoir la même charge nucléaire, mais des masses différentes. Si à un noyau nous ajoutons un proton et un électron, nous ne modifions pas la charge nucléaire puisque les charges positives et négatives ajoutées s'annulent l'une l'autre, mais nous ajoutons une unité à la masse. Nous pouvons donc, sur le papier, associer toute masse nucléaire avec toute charge nucléaire, c'est-à-dire avec toute propriété chimique que nous voulons. La nature ne fournit pas tous les types différents d'atomes que nous imaginons ainsi, mais elle fournit un grand nombre d'exemples de ce genre. Ainsi, les noyaux des deux types différents de chlore contiennent, l'un 35 protons et 18 électrons, et l'autre 37 protons et 20 électrons, la charge positive nette ou *poids atomique*, comme on l'appelle, étant, comme nous l'avons dit, 17 unités dans chaque cas. La disposition des électrons extra-nucléaires régie par une charge positive centrale de 17 unités, donne les propriétés chimiques qui caractérisent le chlore.

L'existence de protons comme partie définie de la structure nucléaire n'est pas une simple supposition. En bombardant les éléments légers avec une grêle de particules alpha, Lord Rutherford a réussi à montrer que les protons peuvent être détachés. Il en

résulte la fabrication d'un noyau d'un autre genre d'atome chimique : il se produit une véritable transmutation des éléments. La méthode utilisée par Rutherford détecte la rupture des atomes simples, et, seuls, quelques atomes sont transformés dans chaque expérience. L'expérience ne produit jamais une quantité que l'on puisse peser ou recueillir d'un atome nouveau, mais elle établit la possibilité de la transmutation. Les atomes, on le voit, ne sont donc pas incassables ; ce ne sont pas des entités sans parties physiques, mais bien des structures sur lesquelles nous pouvons nous livrer à des expériences, et à la construction desquelles la Nature s'est sans doute amusée autrefois comme elle continue à le faire pour les étoiles. C'est cette rupture des noyaux atomiques que nous appelons « rupture de l'atome ». A vrai dire, la rupture d'un atome, considérée dans le sens de la séparation de certains des électrons extérieurs, est la chose la plus simple du monde. Elle se produit dans chaque flamme, dans chaque lampe électrique, comme nous le verrons, mais quand ceci se produit, l'atome se répare lui-même en prenant d'autres électrons. Aucun changement permanent n'a lieu. C'est le noyau central, qui régit la structure du reste de l'atome, qui est si dur à entamer. Tant qu'il conserve ses protons, la masse de l'atome ne change pas ; tant qu'il conserve sa charge, l'identité chimique de l'atome ne varie pas.

Dans le cas des atomes les plus lourds, le noyau est une structure très compliquée, contenant beaucoup de protons et d'électrons, par exemple 226 protons et 138 électrons dans le cas du radium. Une structure si complexe ne semble pas stable : il lui arrive de perdre

une ou plusieurs de ses parties, qui sont alors projetées hors de l'atome avec une grande énergie et il reste un nouveau type d'atome. C'est là le processus de la radio-activité, ou désintégration radio-active. Certains éléments radio-actifs éjectent un électron à grande vitesse hors du noyau, généralement appelé *particule bêta* ; d'autres, comme nous l'avons vu, émettent une particule alpha qui est le noyau d'un atome d'hélium, consistant en quatre protons et deux électrons étroitement combinés. C'est là une nouvelle preuve que les noyaux (certains noyaux, tout au moins) contiennent ces composants. Certains éléments radio-actifs projettent hors de leurs noyaux un type de rayons X très pénétrants appelés *rayons gamma*. Toutes ces radiations témoignent d'une activité intense et d'une très grande quantité d'énergie emmagasinée dans les noyaux en question, et ils prouvent de façon convaincante que les atomes peuvent être transformés en espèces différentes d'atomes, car lorsqu'un élément radio-actif a perdu une particule alpha ou une particule bêta, il devient un nouveau type d'élément chimique, avec des propriétés chimiques différentes des précédentes. Il nous faut, cependant, attendre que les atomes se rompent de leur propre volonté. Nous ne pouvons pas empêcher en laboratoire un élément radio-actif d'accomplir sa tâche ; mais nous ne pouvons pas non plus transformer un élément ordinaire en élément radio-actif. Nous constatons le phénomène, nous ne pouvons pas le produire.

Tous les éléments radio-actifs sont très lourds. Ils se classent en trois familles, chacune commençant par un élément dont les atomes donnent les particules alpha et deviennent des atomes d'un élément différent.

Ces atomes, à leur tour, sont radio-actifs et se transforment en d'autres éléments. Le processus s'arrête quand la chaîne de transformation atteint un des éléments chimiques ordinaires, ordinaire en ce sens qu'il est stable et demeure toujours dans le même état. Certains éléments radio-actifs se détériorent très vite ; par exemple, une moitié des atomes de l'élément appelé Actinium A subissent une transformation en quelques millièmes de seconde, tandis qu'il faut plusieurs milliers de millions d'années pour que la moitié des atomes d'uranium se transforme. La cause de ces différences énormes dans les vitesses de désintégration reste encore à trouver.

En résumé, le noyau régit le fonctionnement de l'atome et lui impose ses propriétés chimiques et physiques. Il est protégé par ses électrons de patrouille et est si compact que, seule, la force la plus intense, telle que celle due au bombardement des particules alpha, peut l'endommager, et même ces particules ne peuvent se rapprocher suffisamment des noyaux les plus fortement chargés des atomes les plus lourds pour faire des dégâts. Nous avons vu, cependant, que les noyaux très lourds tombent en morceaux d'eux-mêmes en cédant une énorme énergie. Un gramme de radium en cours de désintégration vers sa forme finale qui est le plomb métal, cède assez d'énergie pour actionner un moteur de cent chevaux pendant deux jours. Cette désintégration, cependant, se produit si lentement qu'elle n'est à moitié terminée qu'au bout de 1.730 ans, mais même alors un gramme de radium donne assez de chaleur en une heure pour élever une fois et demie son propre poids d'eau de la température ambiante jusqu'au point d'ébullition. Ces lourds

noyaux sont donc le siège d'énergie formidable *qu'ils remettent en liberté en se brisant*. Les noyaux légers, par contre, ont besoin d'une énergie énorme pour être rompus, ce qui veut dire qu'une quantité d'énergie énorme serait mise en liberté si nous pouvions les reconstruire. On peut montrer, par exemple, que si nous savions comment combiner quatre noyaux d'hydrogène — protons — et deux électrons de façon à former un noyau d'hélium, nous aurions à notre disposition, en fabriquant de cette façon un gramme d'hélium, une source d'énergie suffisante pour actionner un moteur de 100 chevaux nuit et jour pendant trois mois. Si donc, un jour, nous apprenons à transmuter les éléments, l'énergie ainsi disponible sera probablement plus intéressante que les métaux ainsi obtenus, à condition qu'elle soit utilisable car elle pourrait apparaître sous forme de réaction de violence plus qu'explosive, ou sous forme de radiation très pénétrante que nous ne pourrions limiter, tels les rayons cosmiques dont nous avons déjà parlé. Il se peut en fait, que les rayons cosmiques aient leur origine dans la combinaison d'atomes plus légers qui forment des atomes plus lourds dans l'espace extérieur ; il reste à savoir ce que sont ces atomes. Il semble que la fabrication d'atomes puisse libérer une énergie suffisante pour donner naissance à des rayons de fréquence si élevée comme le montre la nature extrêmement pénétrante des rayons cosmiques. On peut également croire, selon la suggestion de Sir James Jeans, que les rayons ont leur origine dans l'annihilation d'atomes légers, c'est-à-dire de protons, aux limites de l'espace. Ce sont là des questions plutôt discutées.

Abandonnons maintenant le noyau, le maître, et observons les électrons, ses sujets, qui décrivent des orbites autour de lui de façon périodique. Un tel mouvement périodique est le genre de processus auquel la théorie des quanta peut s'appliquer. Nous pouvons nous attendre, d'après ce qui a été dit au chapitre VI à ce que les déplacements des électrons soient restreints de façon particulière, de sorte que la vitesse des électrons sur leurs orbites ne puisse pas avoir n'importe quelle valeur, mais seulement certaines valeurs définies en concordance avec les lois mathématiques établies par la théorie des quanta. Les électrons ne ressemblent pas à des agents libres dans des automobiles, se croisant sur une promenade à n'importe quelle vitesse dont sont capables les automobiles, mais plutôt à des trains dont les mouvements se font sur des voies déterminées et sont contrôlés par des horaires. A un observateur ignorant tout de ces questions, le mouvement des trains semblerait très arbitraire, puisque la machine d'un train à elle seule ne comporte aucun mécanisme pouvant l'empêcher d'aller où il veut. De la même façon, avant que les lois des quanta eussent été découvertes, il semblait naturel de supposer que les électrons dans un atome puissent se déplacer à n'importe quelle vitesse. Quand les électrons font partie d'un atome, cependant, la théorie des quanta fournit l'horaire et les rails du système atomique ou, plutôt, non pas un seul horaire, mais un grand nombre d'horaires possibles. Le système d'électrons doit obéir à l'un d'eux ; les électrons ne peuvent pas se déplacer à des vitesses intermédiaires autour du noyau, bien que les lois ordinaires de la mécanique permettent ces vitesses.

En d'autres termes, seules certaines orbites ou voies, et seules certaines vitesses sur ces voies, sont permises.

Dire que les électrons suivent certains horaires déterminés revient à dire que l'atome peut posséder, en vertu des mouvements des électrons, certaines énergies, mais pas d'énergies intermédiaires. Quand les électrons obéissent à l'un des horaires permis, l'atome est dit en état stationnaire : les électrons ne sont pas stationnaires, mais la valeur de l'énergie atomique l'est. S'il se produit quelque raison qui fasse adopter l'un des autres horaires possibles, les électrons passeront subitement à une série différente de mouvements, et l'énergie de l'atome changera subitement. Supposons, pour préciser, que l'énergie de l'atome diminue : que devient l'énergie en surplus ? Elle apparaît sous forme de radiation qui quitte l'atome. Quelle sorte de radiation ? Cela dépend de la quantité d'énergie libérée. Cette énergie est transformée en radiation d'après la loi des quanta. Une grosse parcelle d'énergie libérée dans un processus atomique devient un paquet de radiations à haute fréquence, c'est-à-dire de courte longueur d'onde : une petite parcelle d'énergie devient un paquet de radiations à basse fréquence, c'est-à-dire de grande longueur d'onde.

Nous pouvons résumer cette théorie due au professeur Niels Bohr, en disant qu'un type donné d'atome ne peut exister que dans certains états définis d'énergie qu'il possède en vertu du fait que ses électrons mobiles ne peuvent se déplacer que sur certaines orbites réglementées par les restrictions de la loi des quanta. Si nous mettons de l'énergie dans l'atome, il passe d'un état stationnaire à un état d'énergie plus

élevée ; si, au contraire, l'atome passe d'un état stationnaire donné à un état d'énergie plus faible, l'énergie libérée est rayonnée sous forme de radiation dont la longueur d'onde est déterminée par la valeur de cette énergie libérée.

Comment pouvons-nous mettre de l'énergie dans l'atome ? Nous pouvons chauffer un gaz de façon à ce que les atomes s'entre-choquent violemment. Si nous chauffons suffisamment, les chocs — ou quelques-uns d'entre eux au moins — seront assez vigoureux pour porter certains des atomes frappés à un degré plus élevé d'énergie interne. Une autre méthode pour mettre de l'énergie dans l'atome consiste à envoyer un courant d'électrons dans le gaz d'un tube à décharge : certains des électrons frapperont les atomes assez violemment pour accomplir cette fonction. Ou bien, nous pourrions faire tomber des radiations de longueur d'onde appropriée sur les atomes ; certains d'entre eux accapareront de l'énergie de la radiation et passeront à un état d'énergie plus élevée. Dans tous ces cas, les atomes émettront des radiations ; si les circonstances s'y prêtent, ce seront des radiations visibles — la lumière. Cela revient à dire qu'après avoir été porté à un état plus élevé — tendus en quelque sorte — les atomes reviennent à un état inférieur — se détendent — et cèdent l'énergie ainsi libérée sous forme de lumière. Pour un atome donné, la variation réelle d'énergie qui régit la fréquence de la radiation dépendra des deux états stationnaires possibles pris comme états initial et final de l'atome. Cependant, comme il existe un groupe d'énergies possibles séparées par de larges intervalles, seules certaines fréquences sont possibles pour un type parti-

culier de système atomique. Tout type choisi d'atome ne donne donc que certaines longueurs d'ondes : c'est en quelque sorte une minuscule station d'émission de télégraphie sans fil qui dispose d'un groupe particulier de longueurs d'onde choisies çà et là et non de toute longueur d'onde possible entre certaines limites. Nous exprimons ceci en disant que les atomes donnent des spectres de raies, ce qui veut dire que de la bande colorée continue qui représente le spectre d'un solide chaud, un gaz ne rayonne que certaines régions étroites ou raies. Nous disons un gaz, car ce n'est qu'à l'état gazeux que les atomes sont assez séparés pour se comporter de façon normale. Dans un solide, ils sont si serrés que leurs forces électriques se mélangent et chaque atome, au lieu de rayonner les fréquences qui lui appartiennent réellement, rayonne des fréquences mixtes, de sorte qu'en considérant tous les atomes nous avons un spectre continu avec toutes les fréquences représentées.

Examinons maintenant de plus près comment les différents types de radiation sont émis par ce système compliqué de charges mobiles qui occupent l'espace des quelques millions de millions de millions de milliardièmes de centimètre cube que représente un atome. Ces électrons sont disposés en groupes que, par commodité, nous pouvons nous représenter comme limités chacun à une couche spéciale de l'espace entourant le noyau, ceux d'un groupe étant plus près du noyau, ceux d'un autre groupe étant plus éloignés. En d'autres termes, chaque groupe peut être considéré comme limité à une couche sphérique d'espace, tout comme une couche d'un oignon. Ce n'est là qu'une image grossière, car certaines des orbites ne sont pas

réellement circulaires mais sont de longues ellipses. Les électrons situés dans la couche la plus extérieure sont ceux qui ont à supporter les fureurs de la vie quotidienne. C'est eux qui sont responsables des combinaisons chimiques : le choc des collisions entre atomes est reçu par eux. Ils sont plus éloignés du noyau et sont les moins stables des électrons. Il suffit d'une perturbation relativement faible pour les faire sortir de leur orbite et rejoindre une des orbites permises par la théorie des quanta dans l'espace entourant l'atome. Comme il n'y a pas de grandes résistances à surmonter au cours de ce processus, les variations d'énergie qui accompagnent les vicissitudes de ces électrons extérieurs ne sont pas grandes, et les fréquences des radiations émises quand l'atome se réajuste lui-même ne sont pas grandes. Ce sont, en fait, ces variations qui expliquent les raies du spectre visible et ultra-violet.

Si l'atome est frappé suffisamment violemment, par un électron très rapide, par exemple, un de ces électrons extérieurs peut être enlevé et il reste un atome ayant, au total, une charge positive, que nous appelons un atome ionisé. Un second électron peut alors être bousculé de façon telle que l'atome ionisé donne un spectre optique propre : au point de vue optique, un atome ionisé se comporte comme s'il était un nouveau type d'atome, ce qu'il n'est pas, bien entendu. La charge nucléaire est inchangée, et l'atome ramasse bien vite un électron et se répare lui-même. Aucun dommage permanent ne s'établit et nous ne pouvons guère parler de « rupture de l'atome », dans ce cas. Si l'atome est encore plus violemment bousculé, il peut perdre deux ou plus des électrons exté-

rieurs : en employant une étincelle très violente et chaude, tout le groupe extérieur d'électrons peut être épluché en quelque sorte, puisque dans certains atomes il y a jusqu'à sept électrons d'enlevés. Un atome ainsi privé de sa couche d'électrons a été appelé un atome « épluché » par Millikan. Il semble qu'aux températures très élevées qui se rencontrent sur certaines étoiles, les conditions soient telles que les atomes perdent non seulement leur enveloppe extérieure ou couche d'électrons, ce que nous pouvons réaliser en laboratoire, mais aussi les couches intérieures d'électrons, qui entourent le noyau, et il ne reste que les noyaux non protégés. Nous savons que les noyaux, qui constituent pratiquement toute la masse de l'atome, prennent très peu de place, de sorte que nous pouvons admettre, dans le cas d'une substance stellaire de cette sorte, l'existence d'une énorme masse dans un petit espace — ou une énorme densité, pour employer le terme technique. Eddington, qui a montré que cette théorie explique bien le poids anormal de certaines petites étoiles (telles que l'étoile Van Maanen qui a à peu près la dimension de la terre, mais pèse à peu près autant que le soleil), disait qu'une tonne de cette matière « nucléaire » entrerait facilement dans une poche de gilet ! C'est de la matière presque sans espace vide. Mais, sortez un de ces noyaux « épluchés » hors de son milieu d'agitation intense, et placez-le quelque part au froid sur la terre, et il rassemblera des électrons et construira à nouveau un atome complet.

En terminant ainsi cette digression sur les atomes « épluchés », signalons que l'émission de lumière par une flamme ou par le gaz incandescent d'un tube à

décharge, tel que la lumière à vapeur de mercure utilisée par les photographes, est un effet des électrons les plus à l'extérieur de l'atome en question. Supposons, cependant, que nous exposions des atomes à des électrons très rapides. Un électron peut être déplacé de l'un des groupes intérieurs et porté en dehors de l'atome, ce qui met l'atome en état stationnaire d'énergie plus élevée. La place demeurée ainsi vacante, ne tarde pas à être remplie par un électron, et l'atome retournera à un état d'énergie beaucoup moindre. Puisque cette perte d'énergie est relativement grande, la radiation qui lui correspond est de fréquence relativement élevée : en fait, elle appartient au type que nous appelons rayons X. Plus profond dans l'atome est le groupe dont nous déplaçons un électron, plus grande est la fréquence (et le pouvoir pénétrant) des rayons X. Nous voyons maintenant pourquoi les substances solides donnent un spectre en raies de rayons X, tandis que, pour obtenir un spectre en raies dans la région visible, il nous faut un gaz. Dans le cas des rayons X, comme il ne s'agit pas d'électrons extérieurs, peu importe la cause du choc ou quelles sont les forces électriques qui agissent sur les parties extérieures de l'atome ; l'approche d'autres atomes dans le solide n'affecte pas sensiblement les électrons intérieurs. Quand les électrons extérieurs sont en jeu, comme dans le cas de l'optique, ces influences extérieures font toute la différence. Grattez la surface d'un atome, et vous obtenez de la lumière ; agitez l'intérieur et vous obtenez les rayons X. Agitez le noyau et vous transformez la nature entière de l'atome.

L'atome d'hydrogène, bien entendu, offre un cas

particulièrement simple, puisqu'il n'a qu'un électron, et il n'est plus question de groupes intérieurs et extérieurs, ni de spectre d'atome ionisé. Le spectre optique, qui s'étend de l'infra-rouge à l'ultra-violet, a une structure très simple, qui fut la première à être étudiée, et il n'y a pas de spectre de rayons X. Les autres genres d'atomes très légers n'ont pas non plus de spectres de rayons X : en fait, il nous faut arriver à des atomes avec des groupes intérieurs bien formés, pour trouver une radiation de rayons X bien développée avec pouvoir pénétrant. Le gaz hydrogène ordinaire consiste en molécules, chacune d'entre elles étant faite de deux atomes d'hydrogène ; tandis que la décharge électrique décompose généralement le gaz en atomes qui donnent le spectre simple mentionné, les molécules forment aussi des systèmes qui peuvent émettre de la lumière s'ils sont convenablement traités. Le spectre des molécules est toujours beaucoup plus compliqué que celui des atomes, ce qui semble naturel puisque dans la molécule nous avons deux ou plusieurs atomes, agissant l'un sur l'autre et se combinant pour produire des effets compliqués. Les spectres de la lumière émise par les molécules, considérées à part des atomes, consistent en multitudes de raies disposées par groupes qui produisent l'apparence de bandes ombrées, d'où le terme de « spectre de bandes » qui leur est appliqué. Tout ce que l'on peut dire ici est que certains de ces spectres de bandes compliqués, fournis par les molécules consistant en deux atomes seulement, ont été démêlés à l'aide de la théorie des quanta.

Nous avons vu comment la théorie des quanta, appliquée aux électrons mobiles de l'atome, explique

le fait que les atomes, par eux-mêmes, donnent des longueurs d'onde définies et caractéristiques, à la fois dans le visible et dans les spectres de rayons X. Les spectres de rayons X étant engendrés dans les parties protégées de l'atome, sont beaucoup plus simples que les spectres optiques qui, à l'œil inexpérimenté, ne semblent qu'un pêle-mêle de raies. A l'aide de la théorie, cependant, il a été possible de démêler les spectres les plus embrouillés et de choisir, au milieu de la confusion apparente, des séries de raies obéissant à des lois simples. La théorie des quanta a trouvé sa justification dans l'aide effective qu'elle a apportée à la tâche difficile de donner un sens au mélange de groupes compliqués de longueurs d'onde émises. Elle nous a fourni la grammaire à l'aide de laquelle nous parvenons à lire le langage des radiations atomiques et à découvrir, en partant d'un baragouin de lumière (que l'on pouvait auparavant noter, mais non pas comprendre) le caractère des spectres atomiques.

Il faudrait peut-être ajouter que cette image des électrons parcourant des orbites offre certaines difficultés mathématiques, et l'on s'efforce actuellement d'étudier les propriétés des atomes en les considérant comme des groupes d'ondes soumis aux lois des quanta. D'après la nouvelle théorie de la mécanique ondulatoire, comme on l'appelle, les électrons eux-mêmes ont des propriétés ondulatoires, et le paradoxe consistant à prêter aux ondes, d'après la théorie des quanta, certaines propriétés des particules, à savoir qu'elles semblent émises par paquets, est complété en prêtant aux particules certaines propriétés des ondes. Les propriétés des ondes et les propriétés des particules sont nécessaires les unes et les autres, comme nous

l'avons vu, pour expliquer la façon de se comporter de la lumière et de la radiation sous tous ses aspects ; il est admis maintenant que les grains élémentaires de matière et d'électricité nécessitent pareillement la double conception si nous voulons pousser notre enquête jusqu'aux plus petits détails. Quand nous parlons de la lumière, nous pouvons la considérer comme procédant par lignes droites, ou rayons, tant que la structure du phénomène examiné est importante en comparaison de la longueur d'onde de la lumière ; par exemple, la position des ombres et les propriétés élémentaires des instruments tels que les télescopes, peuvent être étudiées à l'aide de la géométrie ordinaire — les méthodes d' « optique géométrique » — si nous acceptons de négliger des caractéristiques de moindre importance dont il a été question quand nous avons parlé des interférences et de la diffraction. Quand, cependant, nous en arrivons à considérer la lumière passant par des corps ayant des dimensions de l'ordre de sa longueur d'onde, ou par des ouvertures minuscules telles que des fentes, les propriétés ondulatoires deviennent des plus importantes, et les méthodes de la géométrie optique avec ses rayons en ligne droite, sont impuissantes. De la même façon, tant qu'il s'agit de la mécanique des portions ordinaires de matière telles qu'elles peuvent se manipuler ou même se voir au microscope, les méthodes ordinaires de dynamique des particules qui étaient universellement en usage il y a un an ou deux encore, sont toujours assez bonnes ; mais lorsqu'il s'agit des électrons ou des protons, les méthodes de mécanique ordinaire ne valent plus rien et il nous faut avoir recours à la nouvelle mécanique ondulatoire.

La particule doit être considérée plutôt comme le centre d'une perturbation d'onde compliquée que comme un point minuscule entouré d'un champ de forces.

Une comparaison grossière fera peut-être mieux comprendre cette conception très subtile : imaginez que les riverains de la barre d'un port, après avoir toujours négligé le système de vagues à l'entrée du port pour ne considérer que la barre de sable submergée, se décident subitement à porter leur attention sur le système de vagues couvrant la surface du port et de la mer extérieure, et disent alors que la barre du port est cet ensemble complexe de vagues. La barre ainsi définie ne sera plus strictement localisée, mais s'étendra sur une vaste région ; il y aura, cependant, une particularité locale marquée correspondant à l'ancienne barre. A ce point de vue, la comparaison est bonne, mais elle est mauvaise en ce sens que les ondes de la théorie de la mécanique ondulatoire doivent être douées de propriétés spéciales, surtout en ce qui concerne les lois de la propagation, que ne possèdent pas les vagues de la mer. La comparaison est bonne, par contre, en ce qui concerne la barre de sable et le système d'ondes, qui sont des façons différentes de considérer une réalité qui les contient toutes deux. L'aspect d'onde et l'aspect particule de matière sont tous deux utiles et même nécessaires ; voilà donc une conciliation possible.

Dans la théorie de la mécanique ondulatoire émise par le Prince L. de Broglie et le Professeur Schrödinger, chaque particule ultime est associée avec (est la manifestation de — peut être représentée par — risquons le mot, est effectivement) un groupe d'ondes

d'intervalle étroit de longueurs d'onde. La distinction entre la « vitesse de phase » et la « vitesse de groupe » d'un système d'ondes est fondamentale pour la théorie, ce qui est un peu gênant. Imaginez la surface d'un étang sur lequel une onde de longueur fixe se déplace constamment. La crête de l'onde avance avec une certaine vitesse appelée la « vitesse de phase ». Supposez maintenant une autre onde de longueur légèrement différente se déplaçant sur la surface du même étang dans la même direction que la première onde, mais avec une vitesse légèrement différente. En un certain endroit, les ondes concourront à produire une perturbation plus violente, un centre d'énergie pour ainsi dire, et ce centre pourra s'avancer avec une vitesse beaucoup plus petite que celle des ondes elles-mêmes.

C'est la vitesse de ce centre que nous appelons « la vitesse du groupe » et cette vitesse du groupe correspond au déplacement de la particule. La vitesse — la vitesse de phase — des ondes supposées de la mécanique ondulatoire est beaucoup plus grande que celle de la lumière, ce qui ne va pas à l'encontre de la théorie de la relativité, car ces ondes ne sont pas des ondes lumineuses — que l'on peut projeter et arrêter — et aucun signal ne peut être fait par leur intermédiaire. Nous pouvons donner à la vitesse de groupe de la particule considérée, la valeur que nous voulons. C'est cette liberté qui rend la théorie utilisable. A chaque vitesse de particule, nous pouvons faire correspondre une longueur d'onde spéciale des ondes correspondantes. Nous n'avons guère grand espoir de nous faire comprendre du lecteur : la nouvelle théorie est à la fois trop nouvelle et trop abstraite

pour qu'une explication simple en soit possible. Les conceptions utilisées par ceux qui l'ont imaginée sont de nature mathématique et il faudra probablement quelque temps avant qu'on puisse en donner une signification physique pouvant être discutée en termes élémentaires.

Les propriétés ondulatoires de l'électron et du proton ne sont pas, cependant, des fictions purement mathématiques, car elles ont été expérimentalement démontrées. On a déjà indiqué que les cristaux offrent une structure très fine et très régulière au moyen de laquelle les ondes très courtes de rayons X peuvent être analysées. Or, en 1927, les Docteurs Davisson et Germer réussissaient à montrer que les électrons lancés sur des surfaces cristallines et réfléchis par ces surfaces produisaient un dessin d'ondes sur une plaque photographique, du même genre que celui prévu d'après la théorie de la mécanique ondulatoire. Depuis lors, le Professeur G. P. Thomson a réussi à obtenir des feuilles de matière cristalline si minces que des électrons relativement lents peuvent passer à travers, et qu'une fois de plus, des dessins d'ondes du type prévu sont obtenus. Parmi les substances utilisées par G. P. Thomson se trouvent de minces pellicules d'or cristallin, dont la minceur sera mieux comprise quand on saura qu'elles sont assez transparentes pour que des détails très fins tels que les briques d'un mur puissent être distingués à travers elles. Plus récemment, encore, le Professeur Dempster a annoncé qu'il a démontré la nature ondulatoire du proton par réflexion sur une surface cristalline. Les prédictions de la théorie sont en train de se confirmer dans le détail et non d'une façon vague et générale.

L'étude entière des spectres, surtout en ses plus petits détails, a été facilitée grâce à la conception de l'électron comme phénomène ondulatoire. La nouvelle théorie montre bien à nouveau que des lois nouvelles, de caractère fondamentalement différent de celles obtenues par l'étude des particularités les plus évidentes de la matière et de la radiation, doivent être obligatoirement formulées quand nous en arrivons à la considération des mystères les plus récents de la physique.

L'étude moderne de l'atome, qui a révélé la structure nucléaire et l'existence des quanta, a beaucoup simplifié la plupart des anciens problèmes de la physique, mais, comme tout grand progrès scientifique, a suscité une levée de nouveaux problèmes. Elle nous a permis de considérer toute matière comme faite seulement de deux éléments constitutifs, l'électron ou atome d'électricité négative et le proton ou unité de structure nucléaire. En même temps que le proton, ou atome de radiation, elle nous a donné un aperçu de la façon dont la lumière est émise et absorbée par les gaz incandescents, ou par les flammes dans le sens le plus large du mot, et elle a donné un sens aux mélanges compliqués de lumière colorée obtenus avec les différents éléments portés différemment à la luminosité. Puisque tous nos renseignements concernant la constitution des corps célestes nous viennent sous forme de lumière, dans la plupart des cas de globes incandescents ou de nuages de gaz dans l'espace extérieur (bien que dans certains cas, tel que celui du soleil, il s'agisse d'une sphère liquide qui émet de la lumière de toutes les fréquences possibles), il est facile de comprendre que les nouveaux renseignements con-

cernant la structure de l'atome aient eu une répercussion profonde sur l'astronomie moderne. Le titre du petit livre du Professeur Eddington, *Etoiles et Atomes*, ou le fait que le livre de Sir J. H. Jeans sur *l'Univers autour de nous*, contient un chapitre sur « l'Exploration de l'atome », montrent bien combien intime est la connexion entre l'astronomie des infiniment petits, qui comprend la circulation des électrons immensément petits autour de leur noyau minuscule, et l'astronomie des infiniment grands qui comprend des étoiles plus grandes que le système solaire entier et des milliers de nébuleuses aussi grosses que notre univers. Dans les corps célestes, les atomes sont exposés à des températures beaucoup plus grandes que sur la terre (température allant jusqu'à 30.000.000 degrés C. à l'intérieur des étoiles, selon quelques astronomes) ; mais notre expérience terrestre nous permet de calculer ce qui se passe à ces températures extraordinaires, et d'en déduire l'explication d'observations étonnantes telles que la sensibilité anormale de l'étoile de van Maanen dont nous avons déjà parlé. L'explication de l'origine des rayons X, offerte par la structure de l'atome, qui a tant facilité les travaux des physiciens modernes, est également importante pour les astronomes modernes.

Si nous connaissions tout de la question de la structure atomique, nous comprendrions la façon dont chaque espèce d'atome attire les autres espèces d'atomes ; les faits des combinaisons chimiques nous paraîtraient clairs et la chimie deviendrait une branche de la physique. L'étude des atomes a certainement offert une explication de certaines des propriétés les plus simples des éléments. Nous savons, par

exemple, que les gaz inertes qui ne se combinent pas aux autres éléments ont un groupe d'électrons extérieurs complet et très symétriquement disposés, comme le montrent leurs spectres et leurs autres propriétés, de sorte qu'il n'existe pas de forces électriques particulières dans des directions déterminées pour servir de manche ou de crochet pour saisir les autres atomes. L'étude des spectres des molécules et de l'énergie nécessaire pour enlever un électron d'un atome contribue à éclaircir la façon dont se comportent les molécules simples ; mais jusqu'à présent il nous faut compter sur l'expérience acquise à l'aide de l'éprouvette et de la balance, plutôt que sur celle acquise par le physicien à l'aide de son spectroscope et de son tube à décharge, si nous voulons savoir comment les atomes se combinent et en quelles proportions pour former des molécules compliquées. Quand nous passons à l'étude de la matière vivante qui consiste pareillement en atomes avec leurs noyaux et leurs systèmes d'électrons, nous nous éloignons encore plus des cas simples de combinaison atomique dont nous comprenons certains détails, et nous arrivons à des régions où le chimiste doit s'entendre avec le physiologiste avant de pouvoir dire ce que feront des molécules aussi compliquées que celles de nos sucs gastriques, par exemple. Si nous connaissions mieux la façon dont se comportent les atomes une fois enrôlés dans les régiments que représentent les grosses molécules organiques, nous pourrions prévoir et comprendre l'action des rayons X et des rayons de radium sur les cellules vivantes de notre corps, de même que nous pouvons maintenant calculer leur effet sur les métaux et les gaz, mais cela est pour le moment hors

de notre pouvoir et il nous faut compter sur l'expérience dans chaque cas particulier, expérience parfois assez peu précise. Si faibles que soient nos connaissances dans les cas compliqués, il nous faut nous rappeler que tout ce qui concerne le côté matériel de la vie est un problème atomique. Si, comme le faisait remarquer récemment un observateur universellement connu, tous les laboratoires de physique du monde s'intéressent tant aux problèmes atomiques, c'est uniquement parce que toute expérience physique convenablement interprétée a une signification en ce qui concerne la façon dont se comporte ce microcosme intelligent, l'atome.



Et Col
2, Rue du
LII

Table des Matières

	Page
PRÉFACE	
CHAPITRE I. — Qu'est-ce que la physique ?	1
CHAPITRE II. — Au sujet de la chaleur et de l'énergie.	16
CHAPITRE III. — Au sujet du son et des vibrations . .	42
CHAPITRE IV. — Au sujet de la lumière et des radia- tions	60
CHAPITRE V. — Au sujet de l'électricité et du magné- tisme	96
CHAPITRE VI. — Au sujet de la théorie des quanta .	114
CHAPITRE VII. — Au sujet de l'atome	128

- Le calcul intégral et différentiel à la portée de tout le monde**, par SILVANUS P. THOMPSON, traduit de l'anglais par A. ERIC GÉRARD, ingénieur aux chemins de fer de l'Etat belge. VIII-290 pages 14 × 19, avec 65 fig., 5^e édition, revue et corrigée, 1924. Relié toile . 35 fr.
- Le calcul intégral facile et attrayant**, par G. BESSIÈRE. VIII-214 pages, 13 × 21, avec 52 figures, 3^e édition, 1931. Broché . . . 17 fr. 50
Ouvrage couronné par la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale.
- La relativité vue simplement**, par G. BESSIÈRE. VIII-148 pages 13 × 21, 34 figures, 1930 15 fr.
- Le calcul des probabilités à la portée de tous**, par FRÉCHET et HALBWACHS, professeurs à l'Université de Strasbourg XII-297 pages, 14 × 19, 1924. Relié 37 fr. Broché 29 fr.
- L'électricité à la portée de tout le monde**, d'après l'ouvrage de Georges CLAUDE, membre de l'Institut, par P. MAURER, ingénieur, chef du service des compteurs à la C. P. D. E., professeur à l'Ecole d'électricité Bréguet et à l'Ecole de Mécanique et d'Electricité industrielle. XVI-450 pages 16 × 25, 233 figures, 1928. Relié 38 fr. Broché 28 fr.
- L'emploi des unités dans la pratique des calculs**, par E. BÉTRANCOURT, ingénieur I. C. A. M. et I. E. G. VIII-87 pages, 13 × 21, avec 2 figures, 1931. Broché 16 fr.
- Le Taylorisme**, par Henry LE CHATELIER, membre de l'Institut. XVI-154 pp. 16 × 25, 9 figures, 1928 20 fr.
- Initiation à l'Algèbre financière**, par J. FISCHER, professeur de mathématiques financières aux Cours supérieurs de sciences commerciales de la Ville de Liège, et par L. D'OR, professeur de mathématiques à l'Ecole Normale de Liège et à l'Institut des Hautes Etudes commerciales et consulaires. 164 pages, 16 × 25, 1931. Broché 20 fr.
- Les Graphiques employés comme procédé d'exposition**, par J. DE TRELLESME, ingénieur civil. IX-141 pages, 16 × 25, 122 figures, 1932. Br. 35 fr.
- L'organisation ménagère moderne**, 2^e édition du « Taylorisme chez soi », par Christine FREDERICK, traduit de l'anglais par A. D. T. X-228 pages 14 × 19, avec figures, 1927 20 fr.