



BIBLIOTHÈQUE
SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION
DE M. ÉM. ALGLAVE

XLVIII

BIBLIOTHÈQUE
SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

DE M. ÉM. AGLAVE

Volumes in-8°, reliés en toile anglaise. — Prix : 6 fr.

Avec reliure d'amateur, tranche sup. dorée, dos et coins en veau. 10 fr.

La *Bibliothèque scientifique internationale* n'est pas une entreprise de librairie ordinaire. C'est une œuvre dirigée par les auteurs mêmes, en vue des intérêts de la science, pour la populariser sous toutes ses formes, et faire connaître immédiatement dans le monde entier les idées originales, les directions nouvelles, les découvertes importantes qui se font chaque jour dans tous les pays. Chaque savant expose les idées qu'il a introduites dans la science et condense pour ainsi dire ses doctrines les plus originales. On peut ainsi, sans quitter la France, assister et participer au mouvement des esprits en Angleterre, en Allemagne, en Amérique, en Italie, etc., tout aussi bien que les savants mêmes de chacun de ces pays.

La *Bibliothèque scientifique internationale* ne comprend pas seulement des ouvrages consacrés aux sciences physiques et naturelles, elle aborde aussi les sciences morales, comme la philosophie, l'histoire, la politique et l'économie sociale, la haute législation, etc.; mais les livres traitant des sujets de ce genre se rattachent encore aux sciences naturelles, en leur empruntant les méthodes d'observation et d'expérience qui les ont rendues si fécondes depuis deux siècles.

72 VOLUMES PUBLIÉS

- J. Tyndall.** LES GLACIERS ET LES TRANSFORMATIONS DE L'EAU, suivis d'une étude de M. *Helmholtz* sur le même sujet, avec 8 planches tirées à part et nombreuses figures dans le texte, 5^e édition 6 fr.
- Bagshot.** LOIS SCIENTIFIQUES DU DÉVELOPPEMENT DES NATIONS. 5^e éd. 6 fr.
- J. Marey.** LA MACHINE ANIMALE, locomotion terrestre et aérienne, avec 117 figures dans le texte. 4^e édition augmentée 6 fr.
- A. Bain.** L'ESPRIT ET LE CORPS considérés au point de vue de leurs relations, avec figures. 5^e édition 6 fr.
- Pettigrew.** LA LOCOMOTION CHEZ LES ANIMAUX, avec 130 fig. 2^e éd. 6 fr.
- Herbert Spencer.** INTRODUCTION A LA SCIENCE SOCIALE. 10^e édit. 6 fr.
- O. Schmidt.** DESCENDANCE ET DARWINISME, avec fig. 6^e édition. . . 6 fr.
- H. Maudsley.** LE CRIME ET LA FOLIE. 5^e édition. 6 fr.
- P.-J. Van Beneden.** LES COMMENSAUX ET LES PARASITES dans le règne animal, avec 83 figures dans le texte. 3^e édition 6 fr.
- Balfour Stewart.** LA CONSERVATION DE L'ÉNERGIE, suivie d'une étude sur LA NATURE DE LA FORCE, par *P. de Saint-Robert*, 5^e édition. 6 fr.
- Draper.** LES CONFLITS DE LA SCIENCE ET DE LA RELIGION. 8^e édition. 6 fr.
- Léon Dumont.** THÉORIE SCIENTIFIQUE DE LA SENSIBILITÉ. 3^e édition. 6 fr.
- Schutzenberger.** LES FERMENTATIONS, avec 28 figures. 5^e édition. 6 fr.
- Whitney.** LA VIE DU LANGAGE. 3^e édition 6 fr.

- Cooke et Berkeley.** LES CHAMPIGNONS, avec 110 figures. 4^e édit. 6 fr.
- Bernstein.** LES SENS, avec 91 figures dans le texte. 4^e édition. . 6 fr.
- Berthelot.** LA SYNTHÈSE CHIMIQUE. 6^e édition. 6 fr.
- Vogel.** LA PHOTOGRAPHIE ET LA CHIMIE DE LA LUMIÈRE, avec 93 figures dans le texte et un frontispice tiré en photoglyptic. 5^e édition. . . 6 fr.
- Luys.** LE CERVEAU ET SES FONCTIONS, avec figures. 6^e édition . . 6 fr.
- W. Stanley Jevons.** LA MONNAIE ET LE MÉCANISME DE L'ÉCHANGE. 4^e édition 6 fr.
- Fuchs.** LES VOLCANS ET LES TREMBLEMENTS DE TERRE, avec 36 figures dans le texte et une carte en couleurs. 5^e édition 6 fr.
- Général Brialmont.** LA DÉFENSE DES ÉTATS ET LES CAMPS RETRANCHÉS, avec nombreuses figures et deux planches hors texte. 3^e édition. 6 fr.
- A. de Quatrefages.** L'ESPÈCE HUMAINE. 9^e édition 6 fr.
- Blaserna et Helmholtz.** LE SON ET LA MUSIQUE, avec 50 figures dans le texte. 4^e édition. 6 fr.
- Rosenthal.** LES MUSCLES ET LES NERFS, avec 75 figures. 3^e édition. 6 fr.
- Brucke et Helmholtz.** PRINCIPES SCIENTIFIQUES DES BEAUX-ARTS, suivis de L'OPTIQUE ET LA PEINTURE, avec 39 figures. 3^e édition . . . 6 fr.
- Wurtz.** LA THÉORIE ATOMIQUE, avec une planche. 5^e édition . . . 6 fr.
- Secchi.** LES ÉTOILES. 2 vol., avec 60 figures dans le texte et 17 planches en noir et en couleurs, tirées hors texte. 2^e édition 12 fr.
- N. Joly.** L'HOMME AVANT LES MÉTAUX, avec 150 figures. 4^e édition . 6 fr.
- A. Bain.** LA SCIENCE DE L'ÉDUCATION. 7^e édition. 6 fr.
- Thurston.** HISTOIRE DE LA MACHINE A VAPEUR, revu, annotée et augmentée d'une Introduction par *J. Hirsch*, avec 140 figures dans le texte, 16 planches tirées à part et nombreux culs-de-lampe. 3^e édition. 2 vol. 12 fr.
- R. Hartmann.** LES PEUPLES DE L'AFRIQUE, avec 91 figures et une carte des races africaines. 2^e édition. 6 fr.
- Herbert Spencer.** LES BASES DE LA MORALE ÉVOLUTIONNISTE. 4^e édition 6 fr.
- Th.-H. Huxley.** L'ÉCREVISSE, introduction à l'étude de la zoologie, avec 82 figures 6 fr.
- De Roberty.** LA SOCIOLOGIE. 2^e édition 6 fr.
- O.-N. Rood.** THÉORIE SCIENTIFIQUE DES COULEURS et leurs applications à l'art et à l'industrie, avec 130 figures dans le texte et une planche en couleurs. 6 fr.
- G. de Saprota et Marion.** L'ÉVOLUTION DU RÈGNE VÉGÉTAL. *Les cryptogames*, avec 85 figures dans le texte. 6 fr.
- G. de Saprota et Marion.** L'ÉVOLUTION DU RÈGNE VÉGÉTAL. *Les phanérogames*, avec 136 figures. 2 vol. 12 fr.
- Charlton et Bastian.** LE SYSTÈME NERVEUX ET LA PENSÉE, avec 184 fig. dans le texte. 2^e édition. 2 vol. 12 fr.
- James Sully.** LES ILLUSIONS DES SENS ET DE L'ESPRIT. 2^e édition. . 6 fr.
- Alph. de Candolle.** L'ORIGINE DES PLANTES CULTIVÉES. 3^e édition. 6 fr.
- Young.** LE SOLEIL, avec 86 figures. 6 fr.
- Sir J. Lubbock.** LES FOURMIS, LES ABEILLES ET LES GUÊPES, avec 65 fig. dans le texte et 13 planches hors texte, dont 5 en couleurs. 2 vol. 12 fr.

Ed. Perrier. LA PHILOSOPHIE ZOOLOGIQUE AVANT DARWIN. 2 ^e éd.	6 fr.
Stallo. LA MATIÈRE ET LA PHYSIQUE MODERNE. 2 ^e édition.	6 fr.
Mantegazza. LA PHYSIONOMIE ET L'EXPRESSION DES SENTIMENTS, avec 8 planches hors texte. 2 ^e édition.	6 fr.
De Meyer. LES ORGANES DE LA PAROLE, avec 31 figures	6 fr.
De Lanessan. INTRODUCTION A LA BOTANIQUE. LE SAPIN, avec figures. 2 ^e édition.	6 fr.
E. Trouessart. LES MICROBES. LES FERMENTS ET LES MOISSURES, avec 115 figures dans le texte. 2 ^e édition.	6 fr.
R. Hartmann. LES SINGES ANTHROPOÏDES, avec 63 fig. dans le texte.	6 fr.
Binet et Féré. LE MAGNÉTISME ANIMAL, avec figures dans le texte. 3 ^e édition	6 fr.
O. Schmidt. LES MAMMIFÈRES DANS LEURS RAPPORTS AVEC LEURS ANCÊTRES GÉOLOGIQUES, avec 31 figures	6 fr.
Romanes. L'INTELLIGENCE DES ANIMAUX. 2 ^e édition. 2 vol.	12 fr.
F. Lagrange. PHYSIOLOGIE DES EXERCICES DU CORPS. 3 ^e édition.	6 fr.
G. Dreyfus. L'ÉVOLUTION DES MONDES ET DES SOCIÉTÉS. 2 ^e édition.	6 fr.
Daubrée. LES RÉGIONS INVISIBLES DU GLOBE ET DES ESPACES CÉLESTES, avec 89 figures dans le texte.	6 fr.
Sir J. Lubbock. L'HOMME PRÉHISTORIQUE. 2 vol., avec figures. 3 ^e édi- tion	12 fr.
Ch. Richet. LA CHALEUR ANIMALE, avec figures.	6 fr.
Falsan. LA PÉRIODE GLACIAIRE PRINCIPALEMENT EN FRANCE ET EN SUISSE, avec 405 gravures et 2 cartes	6 fr.
H. Beaunis. LES SENSATIONS INTERNES	6 fr.
Cartailhac. LA FRANCE PRÉHISTORIQUE, d'après les sépultures et les mo- numents, avec 162 gravures	6 fr.
Berthelot. LA RÉVOLUTION CHIMIQUE, LAVOISIER, avec gravures	6 fr.
Sir John Lubbock. LES SENS ET L'INSTINCT CHEZ LES ANIMAUX ET PRINCI- PALEMENT CHEZ LES INSECTES, avec 137 figures	6 fr.
Starcke. LA FAMILLE PRIMITIVE	6 fr.
Arloing. LES VIRUS, avec figures	6 fr.

OUVRAGES SUR LE POINT DE PARAÎTRE :

Ch. André. LE SYSTÈME SOLAIRE.	
Kunckel d'Herculais. LES SAUTERELLES, avec fig.	
Romieux. LA TOPOGRAPHIE ET LA GÉOLOGIE, avec fig. et cartes.	
De Mortillet. L'ORIGINE DE L'HOMME, avec fig.	
Ed. Perrier. L'EMBRYOGÉNIE GÉNÉRALE, avec fig.	
Lacassagne. LES CRIMINELS, avec fig.	
G. Pouchet. LA FORME ET LA VIE, avec fig.	
Bertillon. LA DÉMOGRAPHIE.	

LA MATIÈRE
ET LA
PHYSIQUE MODERNE

PAR
J.-B. STALLO

AVEC UNE PRÉFACE
SUR LA THÉORIE ATOMIQUE

Par **C. FRIEDEL**
De l'Institut
Professeur à la Faculté des Sciences de Paris

Deuxième Édition

PARIS
ANCIENNE LIBRAIRIE GERMER BAILLIÈRE ET C^{ie}
FÉLIX ALCAN, ÉDITEUR
108, BOULEVARD SAINT - GERMAIN, 108

—
1891
Tous droits réservés

INTRODUCTION

LA THÉORIE ATOMIQUE

Quand une théorie, après avoir produit pour le progrès de la science des fruits merveilleux, s'est ainsi légitimée et a été acceptée par la généralité des savants, le moment est venu où elle a besoin d'être soumise de nouveau à un examen attentif.

Il est nécessaire qu'elle soit critiquée sévèrement dans ses fondements, afin que les conséquences qui peuvent s'en déduire ne restent pas en l'air, et ces critiques, quand elles sont faites, comme c'est le cas dans le présent volume, par un esprit distingué, aussi érudit que pénétrant, ne peuvent manquer d'être utiles.

Si elles ne renversent pas la théorie, — et, à vrai dire, il est peu probable que des objections, si fortes soient-elles, puissent complètement détruire une conception scientifique sérieuse, qui à un moment donné a servi à coordonner un grand nombre de faits désormais reliés pour toujours, — elles peuvent cependant la modifier plus ou moins profondément.

En tous cas, elles forcent à réfléchir ceux qui, se servant habituellement de la théorie et y trouvant pour leurs recherches expérimentales un guide sûr, pourraient être tentés de lui accorder une confiance trop absolue.

C'est de l'observation et de l'expérience, c'est-à-dire des faits, que part toute théorie. Elle les groupe ; elle en réunit un nombre de plus en plus grand de même espèce, et de cette réunion l'esprit tire des lois, c'est-à-dire des faits plus généraux qu'il cherche à relier à leur tour entre eux et à exprimer par une relation mathématique. Plus il s'éloigne des faits et de leur expression immédiate, plus il court risque de se tromper. Néanmoins il lui est impossible de s'arrêter : il abstrait, généralise, dépouille les faits de leurs caractères particuliers, jusqu'à ce qu'il arrive à ce qu'il peut considérer comme des principes simples et généraux.

Les savants qui s'occupent d'investigations expérimentales sont, par la nature même de celles-ci, retenus plus près de la réalité que les philosophes, et souvent les controverses de ces derniers se passent par-dessus leurs têtes.

C'est un peu ce qui arrive pour la théorie atomique en ce qui concerne les chimistes.

Ceux-ci peuvent être portés par ces considérations de simplicité qui attirent l'esprit d'une façon si puissante à admettre une matière primordiale unique ; mais, en le faisant, il faut bien avouer qu'ils vont au delà des données de l'expérience et des conclusions légitimes qu'on peut en tirer.

L'étude de la chimie nous montre au contraire que si la manière la plus simple de représenter les faits de combinaison consiste à admettre l'existence d'atomes, c'est-à-dire de particules chimiquement indivisibles, qui

s'agrègent de manières diverses ¹, ces atomes ne peuvent pas être de même nature pour les diverses sortes de matières que nous appelons des éléments.

Aucune expérience jusqu'ici ne nous permet de croire qu'un élément puisse être transformé en un autre

Les divers corps simples ne sont pas, il est vrai, sans relations les uns avec les autres et comme isolés chacun avec ses propriétés. Celles-ci présentent des relations remarquables, qui ont été mises en lumière par Dumas, par MM. de Chancourtois, Newlands, Mendelejeff et par d'autres; les éléments nous apparaissent ainsi comme formant une grande série dont les termes, quoique essentiellement distincts, sont rattachés les uns aux autres par une loi que l'on peut entrevoir sinon formuler rigoureusement.

Peut-être sont-ils tous constitués par une même matière primordiale; mais celle-ci n'a pas été jusqu'ici saisissable à l'expérience, et les corps simples connus paraissent être tous, avec leurs poids atomiques divers, du même ordre de complication, car leurs propriétés chimiques sont comparables entre elles.

Il faut d'ailleurs remarquer que cette notion d'une matière élémentaire unique est plutôt une conception philosophique qu'autre chose. Nous ne pouvons pas séparer la matière de ses propriétés, par lesquelles seules elle se fait connaître. La dépouiller de celles-ci, c'est la faire disparaître. La question de savoir si elle peut être séparée d'une partie de ses propriétés, — de

¹. Cette notion de particules distinctes, entrant dans les combinaisons et en ressortant telles qu'elles, est si naturelle et on peut dire si nécessaire au chimiste, que les savants qui, comme M. Dellingshausen, se refusent à admettre une matière discontinue, s'empressent, après l'avoir détruite, de la reconstituer en admettant des états vibratoires et des concamérations qui sont difficiles à comprendre, d'ailleurs, dans une matière continue, mais qui n'en sont pas moins des particules permanentes, de véritables atomes chimiques.

celles qui différencient les éléments, en conservant celles qui leur sont communes, — n'est pas résolue et ne le sera peut-être jamais.

Mais, admettons pour le moment que cette séparation soit possible réellement et qu'il existe une matière élémentaire unique. Nous serons obligés de considérer les atomes chimiques comme formés par la réunion d'un certain nombre de ces particules primordiales.

Les objections que M. Stallo fait à cette manière de voir ne paraissent pas décisives. Nous ne saisissons pas les atomes dans leur grandeur absolue et les mesures que nous avons de celles-ci, en laissant de côté les tentatives de M. Clerk Maxwell et d'autres et en nous plaçant purement au point de vue chimique, ne sont que des mesures relatives. Nous comparons les atomes entre eux. Celui de l'hydrogène, qui sert habituellement de terme de comparaison et d'unité, peut être néanmoins d'une complication quelconque.

M. Stallo admet que si les atomes chimiques étaient composés, les chaleurs spécifiques devraient être plus grandes pour ceux qui sont formés d'un nombre plus grand de particules, en raison du travail qui se produirait à l'intérieur de l'atome. Ceci serait vrai s'il y avait réellement dans l'atome un travail de désintégration; mais il n'est pas forcé qu'il en soit ainsi. Si cette désintégration n'a pas lieu dans l'atome, elle se produit en réalité quelquefois dans la molécule, par exemple pour la vapeur de soufre, l'ozone, l'iode : or la chaleur spécifique n'en est pas affectée et par suite l'objection tombe d'elle-même.

Dans l'analyse faite par M. Stallo des premiers principes de la théorie mécanique de l'univers, une considération qui nous semble essentielle a d'ailleurs été laissée de côté. L'auteur ne distingue que deux choses, la masse

et le mouvement, essentiellement indépendants l'une de l'autre, et constants chacun de son côté. Il en déduit l'inertie de la masse, l'égalité des unités élémentaires résultant de leur simplicité même, leur dureté, leur inélasticité parfaites.

Ces déductions ne sont pas inattaquables à nos yeux, puisque, comme l'auteur le reconnaît plus loin, on ne peut séparer la masse du mouvement, la matière de ses propriétés. En les séparant, on arrive à raisonner sur des abstractions, et sur des abstractions qui peuvent fort bien ne pas répondre à des réalités.

Mais la considération qui a été négligée complètement, c'est celle de l'arrangement des particules élémentaires ou des atomes ; or, cet arrangement joue un rôle important.

Les propriétés de la matière sont relatives ; elles ne se manifestent que par leur action sur d'autres parcelles de la matière, et cette action varie avec les circonstances de position des diverses parcelles les unes par rapport aux autres. Par exemple, nous pouvons fort bien concevoir des groupes atomiques formés du même nombre de particules élémentaires semblables, et ne différant entre eux que par leur arrangement.

Les conditions de situation relative et d'arrangement ne peuvent donc pas être négligées et c'est une considération qu'il faut ajouter à celles de la masse et du mouvement, pour compléter la notion de matière.

Il résulte de là que l'énergie de position n'est pas simplement une énergie cinétique : elle a son existence réelle ; elle correspond à un mouvement possible dans certaines conditions données, mais non encore effectué, tandis que l'énergie cinétique correspond au mouvement réel.

Les objections élevées contre la théorie d'Avogadro et

en général contre la théorie atomique, ne nous paraissent donc pas atteindre celle-ci telle qu'elle se présente aux yeux des chimistes.

Fussent-elles plus graves, il faudrait encore, avant de les décider à y renoncer, leur offrir autre chose à mettre à la place. Aucun physicien de nos jours n'est, que nous sachions, disposé à jeter par dessus bord la théorie ondulatoire de la lumière à cause des difficultés graves et même des contradictions que présente la conception de l'éther lumineux.

Il sera bien permis aux chimistes de continuer à se servir d'une théorie qui les a aidés à grouper un nombre incalculable de faits, et qui les conduit à en découvrir chaque jour de nouveaux. Ils comprennent d'ailleurs les lacunes qu'elle présente, tout en les voyant peut-être ailleurs que les philosophes. Pour eux, elle ne sera complète que lorsqu'elle pourra fournir une explication mécanique du fait important et général auquel on a donné le nom d'*atomicité* ou valence des atomes. C'est là une condition singulière qui est posée à la combinaison et qui est essentiellement différente de l'énergie dépensée dans cet acte. Elle régit le nombre des atomes qui peuvent s'agréger entre eux de manière à former une molécule et distingue la combinaison chimique de la gravitation dans laquelle la masse intervient seule.

Le problème est posé assez nettement semble-t-il par les chimistes : aux mathématiciens de le résoudre.

C. FRIEDEL,
de l'Institut.

PRÉFACE DE L'AUTEUR

Les pages qui suivent ne se proposent pas de contribuer, à la physique, et moins encore à la métaphysique, mais à la théorie de la connaissance. Elles contiennent les résultats d'une étude un peu attentive de la vraie relation qui existe entre les sciences physiques et le progrès général des connaissances humaines. C'est l'opinion générale des physiciens contemporains, qu'il y a une complète solution de continuité, dans la ligne de ce progrès, au moment où la pensée, détournée des traditions de l'antiquité et du moyen âge sur les phénomènes de la nature et sur leur signification, se met à considérer l'ordre et l'enchaînement de ces phénomènes tels que l'observation et l'expérimentation les manifestent. L'édifice de ce qu'on peut encore appeler philosophie, faute d'un meilleur terme, repose maintenant sur des bases bien différentes de celles sur lesquelles on bâtissait avant Galilée et Bacon. Le programme que formulait Bacon dans la préface de son *Novum organum* — en demandant « que l'œuvre de l'esprit fût entièrement recommencée », *ut opus mentis universum de integro resumatur* — ce programme a été exactement rempli, et le conseil donné par Newton aux physiciens, « de se garder de la métaphysique », est mis partout en pratique. Tout le monde sait que la physique moderne s'est échappée des régions nuageuses de la spéculation métaphysique, et qu'elle en a rejeté les méthodes de raisonnement. On la croit

également affranchie de tout préjugé à l'égard des hypothèses sur lesquelles elle se fonde.

Ma conviction est que cette croyance n'est pas entièrement conforme aux faits. Les idées fausses, qui ont souvent prévalu sur les véritables prémisses logiques et psychologiques de la science, sont une source féconde d'erreurs, et la réaction contre le caractère et les tendances de la pensée moderne est de jour en jour plus apparente. Les bas-fonds et la demi-science du matérialisme — (je fais allusion, d'ailleurs, non aux côtés moraux qu'on lui prête, mais à ses côtés purement intellectuels), — qui, pendant quelque temps, a menacé de flétrir le sol et d'empoisonner l'atmosphère même des plus antiques sommets de la pensée sur le continent européen, — ont la prétention d'être un ensemble de conclusions tirées des faits et des principes établis dans les diverses branches des sciences physiques. C'est une partie de ma tâche d'opposer à cette prétention un examen des concepts fondamentaux et des théories générales de cette branche des sciences physiques qui, en un sens, est le fondement et le soutien de toutes les autres — la physique.

En même temps, un coup d'œil rapide sur quelques-uns des chapitres de ce petit livre, montrera qu'il n'a d'aucune manière l'intention d'être, ouvertement ou non, un plaidoyer en faveur d'un retour au but et aux méthodes de la métaphysique. Au contraire, il tend d'un bout à l'autre à éliminer de la science les éléments métaphysiques latents, à fortifier et non à réprimer l'esprit de recherche expérimentale, à accréditer, et non à discréditer, le grand effort que fait la recherche scientifique pour se donner une base assurée sur un terrain empirique solide, qui permette d'élaborer les données réelles de l'expérience sans préoccupations ontologiques. Une lecture attentive de ces pages montrera, je l'espère, que cet effort est continuellement entravé par l'intrusion perfide du vieil esprit métaphysique dans les méditations de l'homme de science.

Ce fait établi, mon devoir était d'en déterminer le mieux possible les causes, et, dans les étroites limites de mon pouvoir, d'en développer les conséquences. Comme je m'adresse

en partie à une classe de lecteurs chez qui, malheureusement, une connaissance complète des lois de la pensée est une qualité assez rare, il était nécessaire, pour accomplir ma tâche, de faire une excursion dans le domaine de la logique et de discuter brièvement la théorie de la conception. Cette discussion est nécessairement très sommaire, mais j'ose espérer qu'elle ne se trouvera pas tout à fait dépourvue d'intérêt, même pour ceux qui sont familiarisés avec le sujet.

De plus, la théorie atomo-mécanique — que l'on suppose être la base unique et suffisante de la physique — s'est compliquée de certaines spéculations remarquables sur la nature et les propriétés de l'espace, ou plutôt y a conduit. Ce fait m'a obligé d'entreprendre une autre excursion dans le champ des mathématiques, afin d'examiner la valeur de la doctrine qui est généralement connue sous le nom de *géométrie non euclidienne*, avec les hypothèses d'espace non homaloïdal et d'espace à plus de trois dimensions.

Ce n'est pas, d'ailleurs, une nouvelle théorie sur l'univers ni un nouveau système de philosophie que je présente ici. Je n'ai pas entrepris de résoudre tout ou partie des problèmes de la connaissance, mais simplement de montrer que quelques-uns d'entre eux ont besoin d'être posés de nouveau, pour les rendre rationnels, sinon pour les approfondir. C'est une vérité vieille, et pourtant souvent perdue de vue, que beaucoup de questions scientifiques et philosophiques demeurent sans réponse, non par suite de l'insuffisance de nos connaissances, mais parce que les questions elles-mêmes reposent sur des suppositions erronées et veulent des réponses irrationnelles ou impossibles dans les termes mêmes. L'anarchie complète qui règne incontestablement dans la discussion de ce qu'on appelle les questions ultimes de la science, indique que la détermination de l'attitude qui convient à la recherche scientifique vis-à-vis de son objet est le plus pressant des besoins intellectuels de notre temps. C'est d'ailleurs une condition indispensable de réel progrès intellectuel dans tous les temps. Une semblable détermination, quoique partielle, est en soi une véritable avance dans le sens de nos légitimes aspirations intel-

lectuelles. « Bien poser un problème », dit Whewell, « est un pas considérable vers sa solution ». Dans le langage de Kant : « *Es ist schon, ein grosser und nöthiger Beweis der Klugheit und Einsicht zu wissen, was man vernünftiger Weise fragen sollte.* » Et la phrase substantielle de Bacon : « *Prudens quæstio quasi dimidium scientiæ.* »

Mes vues sur l'état actuel de la science physique et la valeur d'un grand nombre d'interprétations théoriques courantes des faits scientifiques sont sans doute en désaccord avec les principes de beaucoup de savants distingués. Je n'ai pas craint de les exprimer. Mais on ne m'accusera pas, j'espère, de méconnaître le mérite des travaux auxquels la civilisation moderne doit la vie, et la recherche scientifique, qui vient en aide à cette civilisation, ses succès pratiques. Si cela devait être regardé comme une marque de présomption, je tiens à dire que beaucoup de textes de savants cités ici laissent percer, comme un sentiment vague encore, la possibilité de mettre en question quelques-uns des éléments de leur foi scientifique. J'ai souvent saisi l'occasion, dans le cours de ma critique, de faire remarquer ces suggestions, afin de montrer que mes pensées ne sont, après tout, que des conséquences inévitables des tendances de la science moderne, et par suite, sont plutôt « *partus temporis quam ingenii* ».

Il est important d'indiquer hautement dès le début, que ce traité n'est à aucun point de vue un exposé nouveau des doctrines d'un livre (« *La philosophie de la nature* », Boston, 1848) que j'ai publié, il y a plus d'un tiers de siècle. Ce livre fut écrit quand j'étais sous le charme des rêveries ontologiques de Hegel. J'étais bien jeune alors, et encore sérieusement atteint de la maladie métaphysique, qui semble être un des désordres inévitables de l'enfance intellectuelle. Le travail dépensé à l'écrire n'a pas été, peut-être, tout entier perdu, et il y a dans ce livre des choses dont je ne rougis pas, même aujourd'hui. Mais je regrette sincèrement cette publication, qui est, dans une certaine mesure, expiée par le contenu du présent volume.

J.-B. STALLO.

LA MATIÈRE

ET LA

PHYSIQUE MODERNE

CHAPITRE PREMIER

INTRODUCTION

Les sciences physiques modernes visent à une interprétation mécanique de tous les phénomènes de l'univers. Elles cherchent à expliquer ces phénomènes en les réduisant à ces deux éléments dans la masse et le mouvement, et en montrant, leur diversité et dans leurs changements de simples différences et variations dans la distribution et l'agrégation dans l'espace de corps ou particules ultimes et invariables. Naturellement la suprématie de la mécanique s'est fait remarquer d'abord dans le domaine des sciences qui s'occupent de mouvements visibles et de masses palpables — dans l'astronomie et la physique des masses ; mais elle est loin d'être universellement reconnue dans toutes les sciences physiques, en y comprenant, non seulement la physique moléculaire et la chimie, mais aussi les branches de la recherche scientifique qui ont à compter avec les phénomènes de la vie organique.

On dit que les progrès théoriques aussi bien que pratiques des sciences naturelles durant les trois derniers siècles sont l'œuvre de la mécanique qui, outre qu'elle a créé les instruments de la recherche scientifique fructueuse, lui a aussi fourni ses principes et ses méthodes. Il est, en effet, incontestable que la tentative d'appliquer d'une façon suivie les

STALLO.

f

principes de la mécanique marque une nouvelle époque dans l'histoire de la science. Les inventeurs de la physique moderne sont partis de ce principe, implicite, sinon déclaré, que toute véritable explication des phénomènes naturels est une explication mécanique. Si ce principe ne trouva point tout d'abord d'expression explicite, c'est, d'une part, parce que les principes s'affirment ordinairement d'eux-mêmes, dans la pensée comme dans l'action, avant d'être distinctement saisis, et d'autre part, à cause de cette circonstance que la science fut longtemps contrainte de fleurir à l'ombre de la métaphysique ou de la théologie. Mais après Stevinus, Fermat et Galilée, la doctrine que toute action physique est une action mécanique ne tarda pas à être exprimée. Du vivant même de Galilée — un an avant sa mort — Descartes annonçait que « toutes les variations de la matière ou toute la diversité de ses formes dépend du mouvement ¹ ». Et, neuf années avant l'apparition des *Principia* de Newton, Thomas Hobbes déclarait que « le changement (c'est-à-dire le changement physique) ne peut être autre chose qu'un mouvement des parties du corps changé ² », ajoutant en même temps qu'il « ne peut y avoir d'autre cause du mouvement d'un corps qu'un autre corps contigu en mouvement ³ ». Leibnitz est encore plus absolu : il affirme que la doctrine en question n'est pas une simple induction expérimentale, mais une vérité évidente par elle-même. « Tout se fait mécaniquement dans la nature, dit-il, principe qu'on peut rendre certain par la seule raison et jamais par les expériences, quelque nombre qu'on en fasse ⁴. » Lui aussi insiste sur ce point que tout mouvement est causé par un choc. « Un corps n'est jamais mù naturellement que par un autre corps qui le presse en le touchant ⁵. » Semblablement Huygens, le grand contemporain de Leibnitz et de Newton, dit que « dans la vraie philosophie, les causes de

1. « Omnis materiae variatio sive omnium ejus formarum diversitas pendet a motu. » Cartes, *Princ. Phil.* II, 23.

2. « Necessè est ut mutatio aliud non sit præter partium corporis mutati motum. » Hobbes, *Philos. prima, pars secunda*, IX, 9.

3. « Causa motus nulla esse potest in corpore nisi contiguo et moto. » *Ibid.*

4. Leibnitz, *Nouveaux essais*, opp. ed. Edmann, p. 383.

5. 5^e lettre à Clarke, Erdmann, p. 767. D'où Wolf, exposant dogmatiquement la philosophie leibnitzienne : « Corpus non agit in alterum nisi dum in ipsum impingit ». Wolf *Cosmologia, gen.*, 129.

tous les effets naturels sont et, d'après lui, doivent être conçus mécaniquement, sous peine de renoncer à rien comprendre en physique¹ ». Et dans le premier traité étendu de physique qui fût jamais publié, celui de Musschenbroek, l'auteur avance comme un axiome que « aucun changement n'est produit dans un corps qui n'ait pour cause un mouvement² ».

L'expression la plus précise, cependant, de cette proposition que le but et l'objet véritables de toute science physique est une réduction des phénomènes de la nature à un système mécanique cohérent, se trouve dans les écrits publiés pendant la seconde moitié du présent siècle, depuis les découvertes faites en chimie organique à l'aide de la théorie atomique, les révélations du spectroscope, l'établissement de la doctrine de la conservation de l'énergie, et la promulgation de la théorie mécanique de la chaleur avec son complément, la théorie cinétique des gaz. Ainsi Kirchhoff, un des inventeurs de la théorie de l'analyse spectrale, disait en 1865 : « Le but suprême auquel les sciences naturelles sont contraintes de viser, mais qu'elles n'atteindront jamais, c'est la détermination des forces présentes dans la nature, et de l'état de la matière à un moment donné — en un mot, la réduction de tous les phénomènes de la nature à la mécanique³ ». C'est avec le même sens qu'Helmholtz disait, dans son adresse inaugurale au congrès de l'association des médecins et naturalistes à Innsbruck, en 1869 : « L'objet des sciences naturelles est de trouver les mouvements sur lesquels tous les autres changements sont basés, et les forces motrices correspon-

1. « ... in vera philosophia, in qua omnium effectuum causæ concipiuntur per rationes mechanicas : id quod meo iudicio fieri debet nisi velimus omnem spem abjicere aliquid in physicis intelligendi. » Hugenii opp. reliqua. Amst. 1728, vol. I (Tract. de lumine), p. 2.

2. Nulla autem in corporibus inducitur mutatio, cujus causa non fuerit motus, sive excitatus, sive minutus, aut suffocatus ; omne enim incrementum vel decrementum, generatio, corruptio, vel qualiscumque alteratio, quæ in corporibus contingit a motu pendet. » P. v. Mussehbrock, *Introd. ad philos. naturalem*, vol. I, cap. I, § 18 (éd. Patav. 1768).

3. « Das höchste Ziel, welches die Naturwissenschaften zu erstreben haben, aber niemals erreichen werden, ist die Ermittlung der Kräfte, welche in der Natur vorhanden sind und des Zustandes in dem die Materie in einem Augenblick sich befindet, mit einem Worte, die Zurückführung aller Naturscheinungen auf die Mechanik. » Kirchhoff, *Ueber das Ziel der Naturwissenschaften*. Protectoratsrede, Heidelberg, 1865, S. 9, 24.

dantes — de se ramener elles-mêmes à la mécanique¹ ». Clerk Maxwell n'est pas moins net : « Quand un phénomène physique, » écrit-il, « peut être complètement décrit comme un changement dans la configuration et le mouvement d'un système matériel, on dit que l'explication dynamique de ce phénomène est complète. Nous ne pouvons pas concevoir qu'une explication ultérieure soit ou nécessaire ou possible, car dès que nous savons ce que signifient les mots *configuration*, *masse* et *force*, nous voyons que les idées qu'ils représentent sont si élémentaires qu'elles ne peuvent pas être expliquées par autre chose² ».

Des citations semblables, tirées des écrits de physiciens éminents, pourraient être multipliées presque indéfiniment, et, si on passe des physiciens aux physiologistes, on rencontre également des déclarations explicites. « Chaque analyse », disait Ludwig en 1852, « de l'organisme animal a ainsi mis en lumière le nombre limité des atomes chimiques, la présence de la lumière, véhicule de la chaleur (de la chaleur), et celle des fluides électriques. Ces données conduisent à cette inférence que tous les phénomènes de la vie animale sont simplement des conséquences, des attractions et des répulsions résultant du concours de ces substances élémentaires³ ». Wundt, écrivant vingt-cinq ans après, s'exprime de la même manière : « La manière de voir qui est maintenant devenue dominante (en physiologie), et qu'on appelle ordinairement l'hypothèse physique ou mécanique, a son origine dans la conception causale qui a longtemps prévalu dans les

1. « Das Endziel der Naturwissenschaften ist, die allen andern Verenderungen zu Grunde liegenden Bewegungen, und deren Triebkräfte zu finden, also sich in Mechanik aufzulösen. » Helmholtz, *Popularwissenschaftliche Vorträge*, I, 93.

2. Clerk Maxwell, « on the Dynamical Evidence of the Molecular Constitution of Bodies » (sur l'évidence de la conception dynamique de la constitution moléculaire des corps). « *Nature* », 4 et 11 mars 1875.

3. So oft nun eine Zergliederung der leistungserzeugenden Einrichtungen des thierischen Körpers geschah, so oft stiess man schliesslich auf eine begrenzte Zahl chemischer Atome, die Gegenwart des Licht- (Waerme-)Aethers und diejenige der electrischen Fluessigkeiten, Dieser Erfahrung entsprechend zieht man den Schluss, dass alle vom thierischen Körper ausgehenden Erscheinungen eine Folge der einfachen Anziehungen und Abstossungen sein moechten, welche an jenem elementaren Wesen bei einem Zusammentreffen derselben beobachtet werden ». Ludwig, *Lehrbuch der Physiologie des Menschen*, Band I, Einleitung, p. 2.

branches voisines de la science naturelle, d'après laquelle la nature est une simple chaîne de causes et d'effets, les lois ultimes de l'action causale étant les lois de la mécanique. La physiologie apparaît ainsi comme une branche de la physique appliquée, son problème étant la réduction des phénomènes vitaux aux lois générales de la physique, et ainsi, en dernière analyse, aux lois fondamentales de la mécanique ¹ ». Avec plus d'ampleur encore, Haeckel : « La théorie générale de l'évolution... suppose que, dans la nature, il y a un vaste processus de développement, un, continu et éternel, et que tous les phénomènes naturels sans exception, depuis le mouvement des corps célestes et la chute de la pierre qui roule, jusqu'à la croissance des plantes et la conscience de l'homme, sont soumis à la même grande loi de causalité, — qu'ils doivent, en fin de compte, être réduits à la mécanique atomique ² ». Haeckel déclare que cette théorie « est la seule théorie scientifique qui offre une explication rationnelle de l'univers et satisfasse l'intelligence qui exige des liaisons causales, parce qu'elle enchaîne tous les phénomènes de la nature comme des parties d'un grand et unique processus de développement, et comme une série de causes et d'effets mécaniques ³ ». Dans le

1. « Die jetzt zur Herrschaft gelangte Auffassung dagegen, die man als die physikalische oder mechanistische zu bezeichnen pflegt, ist auch der in den verwandten Zweigen der Naturwissenschaft schon länger zur Geltung gekommenen causal-naturansicht entsprungen, welche die Natur als einen einzigen Zusammenhang von Ursachen und Wirkungen ansieht, wobei als letzte Gesetze, nach denen die natürlichen Ursachen wirken, sich stets die Grundgesetze der Mechanik ergeben. Die Physiologie erscheint daher als ein Zweig der angewandten Naturlehre. Ihre Aufgabe erkennt sie darin, die Lebenserscheinungen auf die allgemeinen Naturgesetze, also schliesslich auf die Grundgesetze der Mechanik, zurückzuführen. » Wundt, Lehrbuch der Physiologie des Menschen, 4te Auflage, p. 2.

2. « Die allgemeine Entwicklungslehre...nimmt an, dass in der ganzen Natur ein grosser einheitlicher, ununterbrochener und ewiger Entwicklungsvorgang stattfindet, und dass alle Naturerscheinungen ohne Ausnahme, von der Bewegung der Himmelskörper und dem Fall des rollenden Steins bis zum Wachsen der Pflanze und zum Bewusstsein des Menschen, nach einem und demselben grossen Causal-Gesetze erfolgen, dass alle schliesslich auf Mechanik der Atome zurückzuführen sind. » Haeckel, freie Wissenschaft und freie Lehre, pp. 9, 10.

3. « Der Monismus, die universale Entwicklungstheorie oder die monistische Progenesistheorie ist die einzige wissenschaftliche Theorie, welche dass Welt-ganze vernunftgemäss erklärt, und das Causalitäts Bedürfniss unserer menschlichen Vernunft befriedigt, indem sie alle Natur-Erscheinungen als Theile eines einheitlichen grossen Entwicklungs-Processes in mechanischen Causal-Zusammenhang bringt. » *Ibid.*, p. 11.

même sens Huxley parle de cette « conception purement mécanique vers laquelle tendent les efforts de la physiologie moderne ¹ ».

Une très lucide et très complète exposition des tendances des sciences physiques modernes se trouve dans le passage suivant, extrait d'une récente leçon d'Emile Du Bois-Reymond — également distingué comme physicien et comme physiologiste : « La science naturelle — ou, pour parler plus exactement, la connaissance scientifique de la nature, ou la connaissance du monde matériel avec l'aide et dans le sens de la physique théorique — est une réduction des changements du monde matériel à des mouvements d'atomes causés par des forces centrales indépendantes du temps, c'est-à-dire une réduction des phénomènes de la nature à la mécanique atomique. C'est un fait d'expérience psychologique que, toutes les fois qu'une telle réduction est effectuée avec succès, notre besoin de causalité est, pour le moment, complètement satisfait. Les propositions de la mécanique peuvent se ramener à la forme mathématique, et portent en elles-mêmes la certitude apodictique qui appartient aux propositions des mathématiques. Quand les changements dans le monde matériel ont été réduits à une somme constante d'énergie potentielle et motrice inhérente à une masse constante de matière, il ne reste plus rien à expliquer dans ces changements.

» L'assertion de Kant, dans la préface des *Fondements métaphysiques de la science de la nature*, que « chaque branche des sciences physiques ne contient de science proprement dite que ce qu'il y a de mathématiques », doit être précisée en substituant « mécanique atomique » à « mathématiques ». C'était évidemment sa propre pensée quand il refusait le nom de science à la chimie. C'est un fait curieux à remarquer que, de notre temps, la chimie, depuis qu'elle a été contrainte, par la découverte des substitutions, à délaissier le vieux dualisme électro-chimique, a fait en apparence un pas en arrière dans sa marche vers la science ainsi conçue. *La résolution de tous les changements dans le*

1. Lay sermons, Addresses and reviews (Sermons laïques, discours, et articles de revues), p. 331.

monde matériel en mouvements d'atomes causés par leurs forces centrales constantes serait le complément de la science naturelle ¹. »

A peu d'exceptions près, les hommes de science d'aujourd'hui soutiennent que cette proposition — toute action physique est mécanique — forme un axiome, sinon en ce sens qu'elle est évidente par elle-même, au moins en ce sens qu'elle est une induction de toute expérience scientifique passée. Ils considèrent donc la validité de l'explication mécanique des phénomènes naturels, non seulement comme indiscutable, mais comme absolue, exclusive et définitive. Ils croient que cette validité n'est conditionnée ni par l'état actuel de l'intelligence humaine, ni par la nature ou l'étendue des phénomènes qui se présentent comme objets de recherche scientifique. Des penseurs comme Du Bois-Reymond ont parfois suggéré qu'elle n'est pas illimitée; mais les seules limites qui lui soient assignées sont celles de la capacité générale de l'intelligence humaine. Quoique l'on accorde qu'il y a une classe de phénomènes — ceux de la vie organique — qui, sous leur aspect caractéristique, sont complètement irréductibles avec le seul secours des principes mécaniques, néanmoins on persiste à dire que ces principes constituent le seul réducteur ² intellectuel qui puisse leur être appliqué, et que le résidu qui résiste à la réduction doit être relégué pour toujours dans cette innombrable légion de faits qui sont à l'épreuve de tous les réactifs de la connaissance humaine. On prétend que, s'il est impossible de construire théoriquement un organisme vivant avec des molécules ou atomes et des forces mécaniques dirigées par le principe de la conservation de l'énergie, les lois de l'attraction électrique et magnétique, les deux premières lois de la thermo-dynamique, etc., la tentative de construire une théorie de la vie en harmonie avec les lois qui régissent l'action matérielle ordinaire doivent être totalement abandonnées. Une telle prétention ne doit pas à mon avis être admise sans un examen attentif des fondements sur lesquels elle repose. Mon but est donc, dans les pages qui suivent, de rechercher si la validité

1. Emile Du Bois-Reymond, *Ueber die Grenzen des Naturerkennens*, p. 2, seq.

2. The only intellectual solvent.

de la théorie mécanique de l'univers, dans sa forme actuelle et avec ses hypothèses ordinaires, est ou n'est pas véritablement absolue dans les limites de l'intelligence humaine, et pour cela, s'il est possible, d'éclaircir la nature de cette théorie aussi bien que son origine logique et psychologique. Evidemment la première question qui se présente dans le cours de l'examen de la validité de cette théorie est celle-ci : Est-elle conséquente avec elle-même et avec les faits qu'elle se propose d'expliquer ? Notre premier problème sera donc de trouver une réponse à cette question.

CHAPITRE II

PREMIERS PRINCIPES DE LA THÉORIE MÉCANIQUE DE L'UNIVERS

La théorie mécanique de l'univers entreprend de rendre compte de tous les phénomènes physiques en les décrivant comme des variations dans la structure et la configuration de systèmes matériels. Elle s'efforce de découvrir, au fond de toutes les diversités qui se manifestent dans le monde matériel, des différences de groupement des unités primordiales de masse, de reconnaître dans tous les changements de phénomènes des mouvements d'éléments immuables, et ainsi de montrer que toute hétérogénéité qualitative n'est que différence quantitative. A la lumière de cette théorie, les derniers résultats de l'analyse scientifique sont la masse¹ et le mouvement, que l'on suppose essentiellement différents. La masse, dit-on, existe indépendamment du mouvement et est indifférente. Elle est la même, que le corps soit en mouvement ou en repos. Le mouvement peut être transmis d'une masse à une autre sans détruire l'identité de l'une ni de l'autre.

Le premier postulat de toute science est qu'il y a quelque chose de constant au milieu de toutes les variations phénoménales. La science n'est possible qu'à la condition que tout changement soit par nature une transformation. Sans cette hypothèse, elle ne pourrait s'acquitter ni de l'une ni de l'autre de

1. Il est à peine nécessaire de dire que c'est avec intention que j'emploie le mot *masse*, et non (comme on le fait ordinairement) le mot *matière*, comme corrélatif de *mouvement*. Quand un corps est dépouillé par la pensée de toutes les qualités qui, d'après les enseignements de la science moderne, sont par nature des phases de mouvement, ce qui reste ce n'est pas la matière, mais la masse.

ses deux grandes fonctions — déterminer, d'après le présent état de choses, le passé d'un côté et l'avenir de l'autre, en montrant que le premier en est l'antécédent nécessaire, et que le second en est le conséquent également nécessaire. Il est évident que les calculs de la science seraient mis en défaut par la disparition soudaine d'un ou de plusieurs éléments, ou par l'intrusion spontanée d'éléments nouveaux. Si donc l'analyse scientifique accorde que la masse et le mouvement sont des termes élémentaires absolument irréductibles, si ces termes subsistent sous toutes les transformations possibles, il suit qu'ils sont l'un et l'autre quantitativement invariables. Par conséquent la théorie mécanique de l'univers suppose la conservation de la masse et du mouvement. La masse peut être transformée par union ou séparation de parties ; mais à travers ces transformations elle reste toujours identique. — De même, le mouvement peut être distribué dans un plus ou moins grand nombre d'unités de masse ; il peut être transmis d'une unité de masse à un nombre quelconque d'unités, sa vitesse étant réduite en raison du nombre d'unités auxquelles se fait la transmission ; néanmoins la somme des mouvements des diverses unités est toujours égale au mouvement de l'unité simple. La direction et la forme peuvent changer ; le mouvement rectiligne peut devenir curviligne, le mouvement de translation peut être brisé en mouvement de vibration, le mouvement d'un corps entier peut être changé en mouvement moléculaire ; mais, durant tous ces changements, il n'est jamais accru, diminué, ni anéanti. La conservation de la masse (ou, comme on dit généralement, en termes peu exacts, la conservation ou l'indestructibilité de la matière) est depuis longtemps un axiome reconnu des sciences physiques. La conservation du mouvement — c'est-à-dire la conservation de l'énergie, ce qui, on le verra, est la même chose, d'après la théorie mécanique — bien qu'elle n'ait été formulée que récemment à titre de principe scientifique distinct, est aujourd'hui universellement regardée comme ayant la même évidence et la même dignité d'axiome que sa contre-partie plus ancienne. La chimie s'est fondée sur le principe de l'indestructibilité de la matière ¹ ; c'est un des principaux pro-

1. On arrive graduellement à comprendre que la conservation de l'énergie est un principe aussi important en chimie que celui de la conservation de la masse ;

grès récents de la physique théorique, que d'avoir réussi à se reconstituer parallèlement sur la base de la conservation de l'énergie. Outre les lois générales de la dynamique et leur application aux actions réciproques des corps solides, liquides et gazeux, la physique embrasse la théorie de ces agents qu'on nommait récemment encore impondérables — la lumière, la chaleur, l'électricité, le magnétisme, etc. Tous ces agents sont traités aujourd'hui comme des formes de mouvement, comme des manifestations différentes de la même énergie fondamentale, et comme soumis à des lois qui ne sont que des corollaires de la loi de sa conservation. La seule exception apparente est la seconde loi de la thermo-dynamique. Cependant Boltzmann et Clausius ont essayé de la réduire au principe de moindre action, ou plutôt à l'extension que lui a donnée Hamilton, au principe de changement d'action, tandis que d'autres (Rankine, Szily, Eddy, etc.), ont cherché à la faire dériver directement du principe de la conservation de l'énergie.

Ainsi donc que la théorie suivant laquelle le mouvement est la cause de tous les changements variés qui se manifestent dans la nature, et toute diversité qualitative apparente se ramène en réalité à une différence quantitative, cette théorie enveloppe trois propositions, qui peuvent être établies comme suit :

I. *Les éléments primaires de tous les phénomènes naturels — les résultats ultimes de l'analyse scientifique — sont la masse et le mouvement.*

II. *La masse et le mouvement sont distincts. La masse est indépendante du mouvement, qui peut lui être donné ou retiré par une transmission de mouvement d'une masse à une autre. La masse reste la même, qu'elle soit en repos ou en mouvement.*

III. *La masse et le mouvement sont constants.*

Parmi les corollaires de la première et de la seconde de ces propositions, il y en a deux aussi évidents qu'importants : l'inertie et l'homogénéité de la masse. Comme la masse et le mouvement diffèrent d'une manière radicale, il est clair que la masse ne peut pas être mouvement ou cause de mouve-

mais quant à présent la notation chimique ne tient compte que des masses et ne fait pas mention des quantités d'énergie gagnées ou perdues dans chaque transformation chimique donnée.

ment — elle est inerte. La masse en elle-même ne peut pas non plus être hétérogène, car toute hétérogénéité est une différence, et toute différence est causée par un mouvement.

Les propositions ci-dessus énoncées sont la base de toute la théorie mécanique. Elles ont l'assentiment universel des physiciens d'à-présent, et doivent être regardées comme les axiomes fondamentaux des sciences physiques modernes. A ces propositions, il faut cependant ajouter l'hypothèse, généralement admise parmi les physiciens et les chimistes modernes, de la constitution moléculaire ou atomique des corps, — d'après laquelle la masse n'est pas continue, mais forme un agrégat d'éléments inaltérables qui, en ce sens au moins, sont de simples unités. Cette hypothèse conduit à quatre autres propositions qui, jointes au principe de la conservation de la masse et du mouvement, constituent les fondements de la théorie atomo-mécanique. Les voici :

1. *Les unités élémentaires de masse, étant simples, sont égales sous tous les rapports.* Ceci n'est manifestement rien de plus que l'affirmation de l'homogénéité de la masse conformément à l'hypothèse de sa constitution moléculaire ou atomique.

2. *Les unités élémentaires de masse sont absolument dures et inélastiques,* conséquence nécessaire de leur simplicité, qui exclut tout mouvement de parties, et par suite, tout changement de forme.

3. *Les unités élémentaires de masse sont absolument inertes et par suite purement passives,* d'où il suit qu'il ne peut y avoir aucune action mutuelle entre elles, autre que le déplacement de l'une par l'autre, causé par une impulsion du dehors.

4. *Toute énergie dite potentielle est en réalité motrice.* Le mot « énergie », dans le langage de la physique moderne, désigne la cause du mouvement. Un mouvement ne peut venir que d'un mouvement, ni ne se convertir qu'en un mouvement. Les unités invariables de masse sont inertes, quelle que soit leur position. Une énergie due à la position seule est impossible.

Il faut maintenant reprendre chacune de ces propositions dans leur ordre, afin de s'assurer si elles concordent avec les faits de l'expérience scientifique, si elles servent à les expliquer, et dans quelles limites.

CHAPITRE III

LES UNITÉS ÉLÉMENTAIRES DE MATIÈRE SONT-ELLES ÉGALES ?

Si toute diversité dans la nature est produite par le mouvement, il en résulte que la masse, le substratum de ce mouvement, est fondamentalement homogène. Cela est si évident que, dans les premières expressions nettement formulées de la théorie mécanique, les deux propositions, le principe et son corollaire, apparaissent à côté l'une de l'autre. Ainsi l'affirmation de Descartes citée dans le premier chapitre ¹ est accompagnée de cette déclaration que « la matière qui existe dans le monde est partout une et identique ² ». Il est vrai que Descartes n'affirme pas l'égalité absolue des éléments matériels simples, parce qu'il ne reconnaissait que deux propriétés premières de la matière, l'étendue et la mobilité, et par suite niait sa constitution atomique. Mais quand l'hypothèse de la structure atomique ou moléculaire de la matière devint l'une des doctrines fondamentales des sciences physiques modernes, le postulat de l'homogénéité fondamentale de la masse prit nécessairement la forme d'une affirmation de l'égalité absolue de ses unités primordiales. Pour des raisons que nous allons discuter, les physiciens et surtout les chimistes d'aujourd'hui semblent portés à oublier ce trait de la théorie mécanique ; mais, parmi ceux qui comprennent que toutes les théories scientifiques doivent au moins être consé-

1. Voyez plus haut, p. 3.

2. « *Materia itaque in toto universo una et eadem existit.* » Cartes, *Princ. phil.*, II, 23

quentes avec elles-mêmes, on ne manque pas de le reconnaître, fût-ce implicitement. « La chimie, dit le professeur Wundt, rapporte encore les diverses qualités de la matière à une différence qualitative originelle entre les atomes. Mais la tendance générale de l'atomisme en physique est de dériver toutes les propriétés qualitatives de la matière des formes du mouvement atomique. *Ainsi les atomes eux-mêmes restent des éléments entièrement dépourvus de qualité*¹. » Ces paroles de Herbert Spencer ont le même sens : « Les propriétés des différents éléments résultent de différences d'arrangement, provenant de la composition et recombinaison d'*unités ultimes homogènes*² ». Même dans les écrits de chimistes distingués, il ne manque pas de paroles témoignant que la nécessité logique pèse sur eux, et force le physicien moderne à insister sur l'égalité fondamentale des éléments matériels. « On peut concevoir, dit Thomas Graham, que les diverses espèces de matière maintenant reconnues pour être des substances élémentaires différentes puissent avoir des molécules ultimes, des atomes uns et identiques, existant dans des conditions de mouvement différentes. L'unité essentielle de la matière est une hypothèse en harmonie avec l'action égale de la pesanteur sur tous les corps. Nous savons avec quelle anxiété Newton chercha ce point, et quel soin il prit pour s'assurer que chaque espèce de substance, « métaux, pierres, bois, graines, sels, substances animales », etc., subissent en tombant la même accélération, et sont par conséquent également lourds.

« A l'état gazeux, la matière est privée de propriétés nombreuses et variées dont elle paraît revêtue à l'état liquide ou solide. Les gaz ne manifestent qu'un petit nombre de propriétés simples et générales, qui peuvent toutes reposer sur la mobilité atomique ou moléculaire. Supposons qu'il n'y ait qu'une sorte de substance, la matière pondérable ; et de plus, que la matière soit divisible en atomes ultimes, *uniformes en grandeur et en poids*. Nous aurons alors une seule substance et un atome commun. L'atome étant au repos, l'uniformité de la matière serait parfaite. Mais l'atome possède toujours plus

1. « *Die Theorie der Materie* », *Deutsche Rundschau*, décembre 1875, p. 381.

2. *Contemporary Review*, juin 1872.

ou moins de mouvement, dû, on peut le supposer, à une impulsion primitive. Ce mouvement donne naissance au volume. Plus le mouvement est rapide, plus l'espace occupé par l'atome est grand, à peu près de même que l'orbite d'une planète s'élargit avec la vitesse de projection. Les seules différences produites par là dans la matière consistent en ce qu'elle est ou plus légère ou plus dense. Le mouvement spécifique d'un atome étant inaltérable, la matière légère n'est plus convertible en matière lourde. Bref, différentes densités de matière forment différentes substances, que l'on a considérées comme des corps simples différents. »

« Mais de plus, ces formes plus ou moins mobiles, plus ou moins légères ou lourdes de matière, ont une singulière relation avec l'égalité de volume. Des volumes égaux peuvent se combiner ensemble, unir leurs mouvements et former un nouveau groupe atomique, conservant la totalité ou la moitié ou quelque simple proportion du mouvement original et du volume qui en résulte. C'est la combinaison chimique. C'est directement une affaire de volume, indirectement liée avec le poids. Les poids qui se combinent sont différents, parce que la densité des atomes et des molécules est différente ¹. »

Des vues analogues à celles de Graham sont exposées par C. R. A. Wright. Il suggère « qu'il n'y a qu'une seule espèce de matière primordiale, tout ce qu'on appelle corps simples et composés étant, pour ainsi dire, des modifications allotropiques de cette matière, différant les unes des autres par la somme d'énergie latente par unité de masse ² ». La conjecture de Proust — aux yeux de qui les corps simples sont des composés ou des formes allotropiques de l'hydrogène — a dû être définitivement abandonnée (même par Dumas et autres qui plusieurs fois cherchèrent à la faire revivre), depuis qu'on a montré insoutenable l'hypothèse d'après laquelle les poids atomiques de tous les corps simples sont des multiples exacts de celui de l'hydrogène. Cependant l'attention a été récemment attirée sur ce fait qu'il semble y

¹. *Idées théoriques sur la constitution de la matière* (Speculative Ideas respecting the Constitution of Matter). *Phil. mag.*, 4^e série, vol. XXVII, p. 81, seq.

². *Chemical News*, 31 oct. 1873.

avoir des indications spectroscopiques de la prédominance de quelques éléments gazeux, tels que l'hydrogène et l'azote, dans certaines nébuleuses qui paraissent représenter les premiers degrés d'un développement planétaire ou stellaire, et d'une augmentation progressive de substances métalliques et autres dans des formes plus avancées — en d'autres termes, d'une différenciation progressive de la matière, d'une marche graduelle de l'homogène à l'hétérogène, dans les étapes successives d'une évolution planétaire ou stellaire ¹. Or, tandis que l'inégalité absolue des unités primordiales de masse est ainsi une partie essentielle des fondements même de la théorie mécanique, toute la chimie moderne repose sur un principe qui la renverse — un principe dont on a dit récemment « qu'il tient en chimie la même place que la loi de la gravitation en astronomie ² ». Ce principe est connu sous le nom de loi d'Avogadro ou d'Ampère : des volumes égaux de toutes les substances, pris à l'état gazeux, et sous les mêmes conditions de pression et de température, contiennent le même nombre de molécules; — d'où il résulte que les poids des molécules sont proportionnels aux poids spécifiques des gaz; que, par suite, ceux-ci étant différents, les poids des molécules sont différents aussi; et que, s'il est vrai que les molécules de certains corps simples soient monoatomiques (c'est-à-dire, consistent en un seul atome chacune), tandis que les molécules des divers autres corps contiennent le même nombre d'atomes, les atomes ultimes de ces corps sont de poids différents.

La loi d'Avogadro, bien qu'elle soit une hypothèse, comme toutes les théories physiques, est considérée comme la seule hypothèse capable de rendre compte de la variation bien connue du volume d'un gaz en raison inverse de la pression (loi de Boyle ou de Mariotte), et en raison directe de la température absolue (loi de Charles), aussi bien que de la combinaison des gaz en proportions volumétriques simples (loi de Gay-Lussac). Elle a servi de base à d'innombrables déductions sur la formation et la transformation des composés chimiques,

1. Cf. J.-W. Clarke, « *L'Évolution et le spectroscope* » (*Evolution and the spectroscope*), *Popular science Monthly*, janvier 1873, p. 320, seq. Les récentes recherches de Lockyer ont mis ces vues en grand crédit.

2. J. P. Cooke, *La chimie nouvelle* (*The new chemistry*), p. 13.

déductions qui jusqu'ici ont été constamment vérifiées par l'expérience.

On voit au premier coup d'œil que ce principe fondamental de la chimie théorique moderne est tout à fait inconciliable avec la première proposition de la théorie atomo-mécanique. Aucune conciliation, assurément, n'est possible, dans l'hypothèse suggérée par Graham. Car elle rend compte des différences de densité en attribuant aux atomes primordiaux égaux des volumes inégaux résultant de l'inégalité des espaces qu'ils occupent par le fait des différences de vitesse dans les mouvements dont les diverses espèces d'atomes sont supposées douées d'une façon inaliénable. Elle rend compte des inégalités de volume dans des masses égales, non des inégalités de masse dans des volumes égaux, et ne peut pas servir à expliquer ce dernier fait, à moins d'emprunter le secours de cette nouvelle hypothèse — à laquelle, il est vrai, elle prête peu ou point de secours — qu'une partie des molécules, sinon toutes, sont des composés ou des agrégats avec divers degrés de complexité. Deux masses ou molécules égales en volume ne peuvent être différentes en densité ou en poids, que si le nombre des unités contenues dans l'une diffère du nombre des unités contenues dans l'autre. Mais la loi d'Avogadro contraint le chimiste à supposer que les molécules des divers corps simples, malgré la diversité de leurs poids, contiennent le même nombre d'atomes. Ainsi l'hydrogène et le chlore, dont les poids moléculaires sont entre eux comme 2 est à 71 sont considérés l'un et l'autre comme diatomiques, c'est-à-dire que leurs molécules sont considérées comme composées de deux atomes chacune. Dans le cas des monades, ou corps simples monoatomiques, comme ceux que l'on vient de mentionner, le raisonnement sur lequel repose cette hypothèse est très simple : Un volume d'hydrogène se combine avec un volume de chlore, pour former deux volumes d'acide chlorhydrique. Chaque volume de ce composé, d'après la loi d'Avogadro, contient autant de molécules que chacun des deux volumes des éléments composants avant la combinaison ; les deux volumes du composé contiennent donc deux fois autant de molécules que chacun des volumes des composants. Mais dans chaque molécule du composé, l'hydrogène et le chlore sont simultanément pré-

STALLO.

2

sents, d'où il résulte que chaque molécule d'hydrogène, aussi bien que chaque molécule de chlore doit avoir fourni au moins un atome à chaque molécule d'acide chlorhydrique, et ainsi devait être composé d'au moins deux atomes.

Dans le cas des dyades (telles que l'oxygène, le soufre, le sélénium, etc.) et des autres corps dont les équivalents sont encore plus élevés, le raisonnement, quoique un peu moins simple, est également concluant en se fondant sur la loi d'Avogadro.

On peut dire que la loi en question détermine seulement le nombre minimum des atomes de chaque molécule, laissant indéterminé le maximum, de sorte que, après tout, la molécule dont le poids est plus grand peut avoir une complexité plus grande en proportion. Mais ici nous rencontrons un obstacle dans une branche de la théorie atomique en physique — la science de la thermo-dynamique. La science moderne regarde la chaleur comme une forme de l'énergie — comme consistant dans une agitation des molécules ou atomes dont les corps sont constitués ; et, pour les corps gazeux au moins, elle distingue entre la partie de cette énergie qui se manifeste sous la forme de température, l'attribuant à des mouvements translatoires de molécules, ou plutôt de leurs centres de masse, et une autre partie, — appelée énergie interne, que l'on suppose résider dans les mouvements oscillatoires ou rotatoires des atomes qui les composent. On a montré expérimentalement, que le rapport entre la chaleur spécifique d'un gaz à une température constante et la chaleur de ce gaz à volume constant ¹, est inférieur à la valeur que lui attribue la théorie qui suppose que toute la chaleur fournie à un corps gazeux est employée à produire un mouvement de translation des molécules, l'effet produit étant la dilatation, ou une augmentation de pression, ou l'un et l'autre. Cette différence, on en rend compte en supposant qu'une partie de la chaleur est convertie en mouvements intramoléculaires, c'est-à-dire en mouvements de particules dans l'intérieur de la molécule,

1. La chaleur spécifique (c'est-à-dire la chaleur nécessaire pour élever la température d'une unité d'une masse quelconque de 1 degré) d'un gaz à une pression constante sous laquelle il se dilate, est nécessairement plus grande que la chaleur spécifique à un volume constant, parce que, dans le premier cas, une partie de la chaleur est employée à l'action mécanique de la dilatation.

sans modifier sa position ni son action totales. On voit maintenant — et Clausius, Boltzmann, Maxwell et autres ont montré — que l'énergie ainsi convertie en mouvements intramoléculaires ou interatomiques doit croître avec la complexité de la constitution moléculaire ; elle deviendrait énorme par conséquent, si une molécule consistait en un nombre d'atomes assez grand pour rendre compte des différences entre les poids moléculaires des corps simples. Le poids moléculaire du chlore, par exemple, est 35 fois $1/2$ celui de l'hydrogène ; et si ces poids sont proportionnels au nombre d'atomes contenus dans chaque molécule, il devient nécessaire de supposer — même en admettant que l'hydrogène est strictement diatomique — que chaque molécule de chlore ne se compose pas de moins de 71 atomes. Mais, si cette hypothèse était valide, presque toute la chaleur fournie au chlore serait absorbée, c'est-à-dire convertie en énergie interne, et sa chaleur spécifique d'après le calcul dépasserait beaucoup le chiffre que lui assigne actuellement l'expérience.

Il y a ainsi des difficultés d'une nature non pas spéculative, mais purement physique et chimique, qui rendent complètement inadmissible la multiplication indéfinie des atomes dans l'intérieur de la molécule, pour rendre compte de la diversité des poids moléculaires. On sait que plusieurs corps simples ne se conforment à la loi d'Avogadro qu'en les supposant monoatomiques. Entr'autres le mercure, dont le poids moléculaire coïncide avec le poids atomique, comme cela est établi par toutes les preuves chimiques possibles, y compris la loi de Dulong et Petit. Il a été démontré par Kundt et Warburg ¹ que le rapport de la chaleur spécifique de la vapeur de mercure à pression et à volume constant, d'après la constatation expérimentale, est précisément égal au chiffre que donne le calcul en se fondant sur l'absolue simplicité de la molécule mercurielle et sur la non-absorption d'une partie quelconque de la chaleur par une action intramoléculaire.

En présence de tout cela, il semble impossible d'échapper à cette conclusion : 1° la prétention des sciences physiques tout entières de fournir une solution partielle et progressive du problème de la réduction de tous les phénomènes phy-

1. *Pogg. Ann.*, vol. CLVII, p. 353.

siques à un système de mécanique atomique, est très imparfaitement confirmée par la constitution actuelle de la chimie théorique ; — 2° la science physique qui s'occupe particulièrement des atomes et de leurs mouvements, part d'une série de propositions qui détruisent la seule base sur laquelle la construction d'une mécanique atomique cohérente puisse être fondée. On ne peut guère espérer voir ces propositions abandonnées prochainement ; car, dans l'opinion des chimistes les plus distingués d'aujourd'hui, un tel abandon jetterait dans une confusion sans espoir, comme avant l'origine de la science, l'ensemble des faits chimiques, laborieusement acquis par l'expérimentation et l'observation, dirigées, au moins en partie, par les propositions rappelées plus haut.

Au sujet des spéculations de ceux qui cherchent à déduire les différences spécifiques entre les unités ultimes de masse de différences entre les prétendues vitesses inaltérables de mouvement ou les sommes d'énergie latente, il faut dire, non seulement qu'ils ne réussissent pas à apporter une solution aux difficultés de la chimie théorique en présence des exigences inexorables de la théorie mécanique, mais aussi que l'attribution d'une énergie motrice inaltérable à une masse donnée est en contradiction avec le postulat fondamental de l'indépendance absolue de la masse à l'égard du mouvement. Helmholtz et autres ont recherché les conditions d'un tourbillon dans un fluide parfaitement homogène, incompressible et sans frottement, lequel fluide (Maxwel l'a montré) est nécessairement continu et ne peut pas être moléculaire ou atomique. Si ces conditions pouvaient être réalisées, nous aurions des volumes constants mais indiscernables, d'un fluide continuellement homogène, doué de quantités constantes de mouvement inaltérable. Mais ni l'énergie, ni le mouvement ne peuvent être essentiellement inhérents à des masses distinctes et séparées (molécules ou atomes), si, comme la théorie mécanique le suppose, la masse et le mouvement sont hétérogènes — si la masse est indépendante du mouvement au point de rester la même dans l'état de mouvement et dans l'état de repos, et si le mouvement peut être transmis d'une masse à une autre. C'est un point sur lequel Sir Isaac Newton, l'un des plus grands fondateurs de la théorie mécanique, a insisté clairement. Newton distingue deux sortes de

force, — la force d'inertie (*vis inertiae*) et la force impressée (*vis impressa*). La première seule, selon lui, est *vis insita*, c'est-à-dire inhérente à la matière; tandis qu'il dit expressément de la seconde que « cette force consiste dans l'action seule et ne reste pas dans le corps après son action ¹ ».

1. Consistit hæc vis in actione sola, neque post actionem permanet in corpore. • *Phil. nat. Princ. math.*, def iv (éd. Le Seur et Jacquier, vol. I, p. 4).

CHAPITRE IV

LES UNITÉS ÉLÉMENTAIRES DE MATIÈRE SONT-ELLES ABSOLUMENT DURES ET INÉLASTIQUES ?

De la différence essentielle de la masse et du mouvement et de la simplicité des unités élémentaires de masse, il résulte que ces unités sont parfaitement dures et inélastiques. L'élasticité implique mouvement de parties, et, par suite, ne peut être un attribut d'atomes véritablement simples.

« Le concept *atome élastique*, remarque avec justesse le Professeur Wittwer, est une contradiction dans les termes, parce que l'élasticité suppose des parties dont les distances peuvent être augmentées et diminuées ¹. »

Les premiers inventeurs de la théorie mécanique regardaient la dureté absolue des particules composantes de la matière comme un trait essentiel de l'ordre original de la nature. « Il me semble probable, dit Sir Isaac Newton, que Dieu, au commencement, fit la matière de particules solides, massives, dures, impénétrables, mobiles, ayant les grandeurs, les formes et autres propriétés semblaibles, et les rapports avec l'espace, qui convenaient le mieux à la fin pour laquelle il les créa; et que ces particules primitives, étant solides sont incomparablement plus dures qu'aucun des corps poreux qui en sont composés; assez dures même pour ne jamais s'user ni se briser; aucun pouvoir ordinaire n'étant capable

¹. *Beiträge zur Molecularphysik, Schlömilch's Zeitschrift für Math. und Phys.*, vol. XV, p. 114

de diviser ce que Dieu lui-même a fait un dans la première création ¹. »

Chose assez étrange, tandis que cette exigence de la théorie mécanique, l'absolue rigidité des unités élémentaires de masse, n'est pas moins impérieuse que celle de leur absolue simplicité, elle se heurte à une dénégation non moins signalée dans la physique moderne. Depuis l'adoption générale des théories modernes sur la chaleur, la lumière, l'électricité, le magnétisme et l'établissement de la doctrine de la conservation de l'énergie, la plus remarquable des hypothèses qui ont été inventées pour fournir un fondement solide à l'interprétation mécanique des phénomènes physiques, c'est l'hypothèse connue sous le nom de théorie cinétique des gaz. D'après cette théorie, un corps gazeux est un fourmillement d'innombrables particules solides se mouvant incessamment en ligne droite, avec des vitesses différentes, dans toutes les directions possibles, ces vitesses et ces directions étant changées par des rencontres, à des intervalles qui sont courts comparés à nos mesures ordinaires de la durée, mais qui sont infiniment longs, comparés à la durée des rencontres. On voit aisément que ces mouvements seraient bientôt terminés, si les particules étaient totalement inélastiques ou insuffisamment élastiques ; car, dans ce cas, il y aurait perte de mouvement à chaque rencontre. La perpétuité supposée du mouvement des parties conduit donc nécessairement à affirmer leur élasticité parfaite. Et cette nécessité résulte non seulement des exigences particulières de la théorie du mouvement des gaz, mais aussi du principe de la conservation de l'énergie dans son application générale aux éléments ultimes des masses sensibles, si ces éléments sont supposés en mouvement.

Dans le cas du choc des corps ordinaires inélastiques ou peu élastiques, il y a une perte de mouvement dont on rend compte par la conversion du mouvement perdu en agitation des parties minuscules qui composent les corps choqués. Mais dans les atomes ou molécules dépourvues de parties, une pareille conversion est impossible, et, par suite, nous sommes contraints de supposer que les molécules ultimes d'un corps gazeux sont absolument élastiques.

¹ *Opticks*, 4^e édit., p. 375.

La nécessité d'attribuer une élasticité parfaite aux molécules ou atomes élémentaires, à cause de la théorie cinétique des gaz, a été expressément reconnue par tous ses inventeurs. « Les gaz, dit Krœnig¹, consistent en atomes qui se comportent comme des sphères solides, *parfaitement élastiques*, se mouvant dans le vide, avec des vitesses définies. » Cette opinion, adoptée par Clausius², est développée par Maxwell, dont l'essai intitulé *Démonstration de la Théorie dynamique des gaz*, a pour première partie un traité « sur les mouvements et les chocs de sphères *parfaitement élastiques* »³. Les plus hautes autorités scientifiques sont également explicites en déclarant que l'hypothèse de la constitution atomique ou moléculaire de la matière est en conflit avec la doctrine de la conservation de l'énergie, à moins que les atomes ou molécules ne soient supposés parfaitement élastiques. « La théorie moderne de la conservation de l'énergie, dit Sir William Thomson⁴, nous défend de supposer soit l'inélasticité, soit un degré quelconque d'élasticité imparfaite, dans les molécules ultimes de la matière, dans le monde ou hors du monde. »

Naturellement, d'habiles avocats de la théorie du mouvement des gaz se sont ingénies à chercher des méthodes, pour résoudre le dilemme dans lequel la théorie mécanique est enfermée. Le plus notable effort dans ce sens est celui de Sir William Thomson, sous la forme d'une conjecture suggérée par les recherches de Helmholtz⁵, sur les propriétés d'un mouvement rotatoire dans un fluide parfait absolument homogène et incompressible, recherches auxquelles il a déjà été fait allusion dans le chapitre précédent. Thomson imagine l'omniprésence de ce fluide, et suppose que les atomes sont en fait des tourbillons formés par des mouvements rotatoires dans ce fluide. Ces tourbillons seraient permanents, d'un volume invariable à cause de leur quantité invariable de mouvement, quoique susceptibles d'une grande variété de

¹ *Pogg. Ann.*, vol. XCIX, p. 316.

² *Ibid.*, vol. C, p. 353.

³ *Phil. Mag.*, 4^e série, vol. XIX, p. 19.

⁴ *Ib.*, vol. XLV, p. 321.

⁵ Cf. Crelle-Borchardt's, *Journal für reine und angewandte Mathematik*, vol. LV, p. 25.

formes ; quelques-uns de leurs caractères, tels que leurs modes d'implication, seraient indestructibles ; ils seraient capables d'être noués sur eux-mêmes ou liés avec d'autres tourbillons, mais ne pourraient jamais être dénoués ni désunis ; finalement, ils seraient incapables d'interpénétration ou de coalescence, et leurs approches mutuelles les feraient rebondir comme des corps parfaitement élastiques.

Nous rendons volontiers hommage à la sagacité déployée dans cette tentative pour délivrer la théorie mécanique de l'une de ses difficultés les plus funestes ; mais il est à craindre qu'elle n'ait aussi qu'un succès illusoire. Il semble clair, en effet, que le mouvement dans un fluide parfaitement homogène, incompressible, et par suite continu, n'est pas un mouvement sensible. Toute différenciation dans un pareil fluide est purement idéale ; malgré le déplacement d'une masse par une autre masse, un espace donné présenterait à chaque moment la même quantité de substance, absolument indiscernable de celle qui y était le moment d'avant. Il n'y aurait pas de différence ni de changement phénoménal. Un fluide dépourvu de différenciation et incapable d'en avoir est aussi impossible qu'un mobile réellement en mouvement fait d'espace pur ; il est aussi inutile pour rendre compte des phénomènes des actions matérielles que le milieu quasi-matériel sans inertie, dont Roger Cotes disait qu'il ne se distinguait pas du vide¹.

De plus, comme Maxwell l'a remarqué², les atomes tourbillons se mouvant dans le fluide hypothétique perdraient l'attribut essentiel de la matière, l'inertie. De tels atomes consisteraient, non en la substance du fluide omniprésent, mais simplement dans les mouvements qu'il renferme. A ces mouvements il faudrait attribuer la persistance de la masse et de l'énergie, et d'eux il faudrait dériver la formation des masses concrètes et tous les phénomènes manifestés par la matière sensible. Mais cela est impossible. Par sa seule nature,

¹ Qui caelos materia fluida repletos esse volunt, hanc vero non inertem esse statuunt, hi verbis tollunt vacuum, re ponsunt. Nam cum hujusmodi materia fluida ratione nulla secerui possit ab inani spatio, disputatio tota fit de rerum nominibus, non de naturis. *Praef in Newtoni Phil. Nat. Princ. Math.*, édit. Le Seur et Jacquier, p. 25.

² *Encycl. Brit.*, 9^e éd., au mot Atome.

le mouvement ne peut pas être le support du mouvement; il ne peut, par lui-même, être générateur du mouvement, qui est essentiellement le produit de deux facteurs opposés, et serait complètement supprimé par la suppression de l'un ou de l'autre. Sur la base de la théorie mécanique, l'antithèse fondamentale entre la masse et le mouvement, l'inertie et l'énergie, ne peut pas être détruite sans emporter avec elle toutes les distinctions qui constituent les éléments de nos conceptions relativement à la nature de l'action physique.

Une autre tentative, un peu analogue à celle de sir William Thomson, pour se soustraire à la nécessité d'attribuer aux atomes élémentaires, comme propriété intrinsèque, l'élasticité, a été faite par A. Secchi. Ce physicien et astronome distingué explique aussi le rebondissement des particules par leur mouvement rotatoire; mais ses atomes, contrairement à ceux de Thomson, sont des corpuscules réels séparés par des interstices vides, et non de simples mouvements dans un milieu éthéré, continu et incompressible. Secchi voit clairement qu'il est inadmissible d'attribuer l'élasticité à de simples atomes élémentaires. « Il est évident, dit-il, que, s'il est possible d'admettre son existence dans une molécule composée, on ne peut faire de même quand il s'agit des atomes élémentaires. En effet, l'élasticité, conçue d'après les idées acceptées suppose un espace vide dans l'intérieur de la molécule qui change de forme en se comprimant, pour revenir ensuite à sa figure première; or nous regardons les atomes comme impénétrables et non comme des réunions de particules solides, par suite ils ne peuvent renfermer des espaces vides leur permettant dilatation et contraction. A la vérité, ce que nous appelons molécule d'un gaz *simple*, c'est-à-dire *chimiquement indécomposable*, n'est pas un atome élémentaire, ou, tout au moins, peut ne pas en être un. Alors cette molécule gazeuse étant un agrégat de véritables atomes, il se peut très bien qu'elle ait des pores intérieurs, et, en général, un certain nombre de propriétés qui n'appartiennent pas à ses atomes constitutifs; il n'est donc pas absurde de la supposer douée d'élasticité. Huygens a admis cette hypothèse pour l'éther. A son avis, les particules éthérées sont composées d'autres plus petites; mais en examinant les

choses à fond, on voit que de cette manière on recule la difficulté sans la résoudre. Nous croyons pouvoir montrer qu'il n'est aucunement nécessaire d'accepter une semblable élasticité comme force primitive ; la répulsion apparente des atomes et leurs collisions réciproques peuvent être rapportées simplement à un mouvement qui leur serait propre, pour cela il suffit de les supposer en mouvement. Prouvons-le :

« Parmi les beaux théorèmes découverts par Poinsot sur la théorie du choc des corps en rotation se trouve celui relatif à leur réflexion contre un obstacle résistant. Il nous apprend que par la seule rotation un *corps dur et non élastique* peut rebondir absolument comme un corps élastique ; il y a mieux : un de ces corps, lancé contre un obstacle fixe, est souvent renvoyé avec une vitesse supérieure à sa vitesse initiale. Le subtil géomètre fait remarquer comment ce phénomène, paradoxal en apparence, est dû à la transformation d'une partie du mouvement rotatoire en mouvement de translation ; d'où il résulte une augmentation de la vitesse du centre de gravité. D'après les théories ordinaires du choc, dans lesquelles on ne tient aucun compte du mouvement de rotation, la proposition précédente est absurde, et cependant elle est parfaitement établie. Ainsi, à côté des cas de *réflexion* ordinaire se trouvent les phénomènes de *progression* ; pour employer l'expression de Poinsot, on pourrait aussi les appeler *réflexions négatives*.

» Dans la réflexion négative, après le choc, le centre de gravité du corps revient en avant avec une vitesse supérieure à celle qu'il possédait d'abord. Ces questions forment une *branche toute neuve et très intéressante de la mécanique* ; elles se démontrent facilement en composant les deux mouvements de rotation et de translation, considérés par rapport aux centres de gravité, de rotation et de percussion, et on arrive facilement à comprendre que, d'une *façon générale*, on puisse dire : un choc, quel qu'il soit, ne peut annihiler en même temps dans un corps les deux mouvements de rotation et de translation ; car si le choc est excentrique, il pourra détruire la rotation et non la translation, et si la direction du choc passe par le centre de gravité, il pourra anéantir la translation, mais non la rotation. Ainsi la quantité de mouvement perdue d'un côté sera gagnée de l'autre : la rotation pourra être ou changée de sens ou simplement accélérée, selon le point du corps qui

sera frappé; d'où la notion des *centres de conversion*. On rencontre des exemples de réflexion succédant au choc de corps en rotation, dans le mouvement des disques lancés par les discoboles, dans celui des galets lancés sur l'eau de façon à former des ricochets, dans les chocs imprimés aux toupies pendant leur rotation, etc. Les joueurs de billards savent parfaitement combien la rotation des billes modifie les lois du choc des corps élastiques établies dans les traités élémentaires ¹. »

« Supposons un cas extrême, c'est-à-dire le choc de deux atomes doués seulement de translation, ou bien encore, se heurtant de telle façon qu'ils ne peuvent rebondir. Evidemment ces deux atomes resteront unis ensemble de même que ceux des corps nommés *durs* par les mécaniciens, et ils formeront un système animé d'un mouvement de translation, résultant des deux autres. Ce système pourra agir comme un corpuscule unique d'une masse double ou triple, en général multiple de celle d'un atome simple, suivant que deux ou un plus grand nombre d'atomes se sont réunis de cette manière. Nous avons là un exemple manifeste d'un agrégat d'atomes liés les uns aux autres, non par l'influence d'une attraction quelconque, mais par la simple inertie. »

Malheureusement la théorie avancée ici trouve peu d'appui dans les théorèmes de Poinso. Secchi soutient que le choc d'un corps en rotation, quand il est excentrique, « peut détruire la rotation, mais non la translation », et que, quand sa direction passe par le centre de gravité, « il peut annihiler la translation, mais non la rotation », de sorte que, dans l'un ou l'autre cas « la quantité de mouvement perdue d'un côté est regagnée de l'autre ² ». Mais si l'on examine avec soin le Mémoire de Poinso, voici ce qu'on voit : quand des corps

¹ Les théorèmes auxquels Secchi se réfère sont contenus dans le dernier d'une série de mémoires (questions dynamiques sur la percussion des corps) publiés par M. Poinso dans le *Journal de mathématiques pures et appliquées* de Liouville, 2^e série, t. II (1837), p. 281, seq. et t. IV (1839), p. 421, seq. Ce remarquable mémoire fut publié (et probablement écrit) par le géomètre octogénaire peu avant sa mort; la dernière partie fut même publiée après sa mort, dans le numéro même du journal de Liouville qui contenait le discours prononcé à ses funérailles par MM. Bertrand et Mathieu.

² Secchi parle invariablement de perte ou de gain de « quantité de mouvement » : mais son argumentation exige que l'on interprète perte ou gain d'énergie. Est-ce là ce qu'il a voulu dire, je ne saurais l'affirmer.

inélastiques en rotation se rencontrent, ou bien leur rotation et leur translation sont conservées l'une et l'autre, ou bien l'accroissement, la diminution ou la perte de l'une est compensée par la diminution, l'accroissement ou le gain de l'autre, mais dans certains cas spéciaux seulement. Poinso^t montre ¹ que, quand un corps inélastique en rotation rencontre un obstacle fixe, s'il est repoussé avec une vitesse de translation supérieure, égale ou inférieure à sa vitesse initiale, ou s'il perd complètement sa vitesse de translation, cela dépend de la distance entre le centre de rotation spontanée et le centre de gravité.

En premier lieu, il y a toujours, entre le centre de gravité et le centre de percussion, « deux points tels que, si le corps en rotation frappe l'obstacle dans la ligne de l'un ou de l'autre, son centre de gravité sera repoussé avec une vitesse plus grande ² ». En second lieu, « il y a toujours, dans tout corps en rotation qui s'avance, deux points de répulsion parfaite, c'est-à-dire deux points tels que, si le corps frappe un obstacle dans la ligne de l'un ou de l'autre, il sera repoussé avec une vitesse parfaitement égale à la vitesse dont il est animé ³ », de sorte que « le centre de gravité du corps est repoussé dans l'espace comme si le corps était parfaitement élastique ». *Mais quand cela arrive, le corps perd dans le premier cas un tiers, dans le second cas deux tiers de sa vitesse de rotation* ⁴. Enfin, dans le troisième cas, « si l'obstacle se présente soit au centre de gravité, soit au centre de percussion, la vitesse de translation est également détruite, la seule différence entre les deux cas étant que dans le premier la vitesse de translation seulement est détruite sans altérer la vitesse de rotation, tandis que dans le second cas la vitesse de translation et la vitesse de rotation sont annihilées l'une et l'autre ⁵ ».

La vérité est donc que, dans les seuls exemples de répulsion parfaite déterminés par Poinso^t, il y a une perte d'un tiers ou de deux tiers du mouvement rotatoire, perte qui

¹ Liouville, Journal, etc., 2^e série, t. II, p. 288, seq.

² Liouville, Journal, 2^e série, t. II, p. 304.

³ L. c., p. 303.

⁴ L. c., p. 307.

⁵ L. c., p. 308.

n'est compensée par aucun accroissement de vitesse de translation, et qu'il y a des cas de choc dans lesquels le mouvement de translation et le mouvement de rotation disparaissent simultanément¹.

Que Secchi ait cru possible de confier à la rotation le soin de conserver l'énergie des atomes qui se choquent, et de la substituer à la « qualité occulte » d'une élasticité parfaite, c'est ce qui semble presque incroyable quand nous venons à considérer l'usage qu'il fait de sa propre théorie. Cette théorie, selon lui, sert à expliquer nombre de choses, entr'autres la formation d'agrégats moléculaires d'atomes simples et les phénomènes de la gravitation. Il explique ainsi que les atomes s'agrègent pour former des molécules composées² : « Supposons un cas extrême, c'est-à-dire la collision de deux atomes doués seulement de translation, ou bien encore, *se heurtant de telle façon qu'ils ne peuvent rebondir* (ce qui a lieu si des atomes en rotation se heurtent dans la direction de leurs axes de rotation). Evidemment ces deux atomes resteront unis ensemble de même que ceux des corps appelés « durs » par les mécaniciens, et ils formeront un système animé du mouvement de translation, résultant des deux autres. Ce système pourra agir comme un corpuscule d'une masse unique, double, triple, en général ou multiple de celle d'un atome simple, suivant que deux ou un plus grand nombre d'atomes se sont réunis de cette manière. Nous avons là un exemple manifeste d'un agrégat d'atomes liés les uns aux autres, non par l'influence d'une attraction quelconque, mais

¹ Quoique je sois depuis longtemps indifférent aux questions et aux réclamations de priorité, il n'est peut-être pas hors de propos de dire que les pages qui précèdent furent écrites avant que j'eusse lu le très bon pamphlet « Das Räthsel der *Schwerkraft* » Brunswick, Vieweg et fils, 1879) de D. C. Isenkrahe, avec lequel je suis heureux de me trouver d'accord quant à la validité de la tentative de Secchi pour déduire la propriété de la répulsion parfaite de la rotation des corps inélastiques avec l'aide de la théorie de la rotation exposée par Poinsot, quoique je ne puisse d'ailleurs adhérer à la théorie propre d'Isenkrahe sur la gravitation. Il y a d'autres coïncidences — toutes d'autant plus intéressantes qu'elles sont, sans doute, tout à fait accidentelles — entre les critiques contenues dans ce pamphlet, des spéculations de Spiller, et l'appréciation que j'en ai publiée pour la première fois dans *The popular science monthly*, janvier 1874. Il est à regretter qu'Isenkrahe, avant de publier son essai, n'ait pas vu le mémoire important de William B. Taylor, cité plus loin, à propos des

² Théories cinétiques de la gravitation ».

¹ *L'unité*, etc., p. 51 seq.

par la simple inertie ». A en juger par ce passage, Secchi pouvait difficilement ignorer que la collision des corps inélastiques en rotation ne se résout pas toujours en répulsion pseudo-élastique. Et dans son application aux phénomènes de la gravitation sa théorie détruit complètement son propre fondement. Il cherche à rendre compte de la gravitation en supposant que la densité du milieu éthéré qui entoure tous les corps ou molécules pondérables va en augmentant du centre à la surface¹, et cet accroissement de densité, il en fait une conséquence de la conversion progressive du mouvement rotatoire en mouvement de translation dans les particules de l'éther, de sorte que ces particules sont perpétuellement tirées des « centres d'agitation » vers le dehors. « Évidemment, dit Secchi, un centre d'agitation, alors même qu'il est unique, pourvu qu'il soit animé d'un mouvement suffisamment énergétique et durable, peut déterminer l'agitation d'un milieu illimité, et le modifier de façon à ce que la densité minimum, au centre, aille en croissant à mesure que l'on s'approche de la circonférence². » Secchi ne dit pas pourquoi il y aurait une perpétuelle augmentation dans les mouvements de translation des particules de l'éther aux dépens de leurs mouvements rotatoires, pourquoi ce serait toujours, ou en général, le mouvement de rotation qui se transformerait en mouvement de translation, et non inversement; et il n'indique pas la source de cette agitation « énergétique et durable » au centre, à laquelle il attribue la production d'une continuelle agitation d'une sphère éthérée sans limites; de sorte que cette explication des phénomènes de la gravitation est d'une validité très douteuse. Mais laissons cela; assurément, si le mouvement

¹ Cette supposition est identique à celle de sir Isaac Newton qui, dans sa lettre à Boyle (*Newton's Works*, éd. Horsley, vol. IV, p. 385, seq.), spéculant sur la « cause de la gravité », dit : « Je supposerai l'éther forme de parties différentes les unes des autres en légèreté par une infinité de degrés... de telle sorte que du sommet de l'air à la surface de la terre et de la surface de la terre à son centre, l'éther est insensiblement de plus en plus subtil. Imaginez maintenant un corps suspendu dans l'air ou étendu sur la terre; l'éther étant par hypothèse plus dense dans les pores qui sont dans les parties supérieures du corps que dans ceux des parties inférieures, et cet éther plus dense étant moins apte à se loger dans ces pores que l'éther plus subtil d'en bas, il s'efforcera d'en sortir et de trouver chemin vers l'éther plus subtil d'en bas, ce qui ne peut se faire que si les corps descendent pour lui faire place en haut ».

² *L. c.*, p. 538.

rotatoire des particules dures est graduellement transformé en mouvement de translation, il y a, il le montre lui-même, une fin à leur répulsion, et nous sommes de nouveau en présence de ce problème non résolu : concilier le choc perpétuel d'atomes simples, durs, et par suite inélastiques, avec la conservation de leur énergie initiale.

La difficulté paraît donc inhérente au sujet et insoluble. Il n'y a pas de méthode connue dans les sciences physiques qui permette de renoncer à l'hypothèse de l'élasticité parfaite des particules dont on dit que les corps pondérables et leurs enveloppes hypothétiques impondérables sont composés, quoique cette hypothèse soit en opposition avec une des exigences essentielles de la théorie mécanique.

CHAPITRE V

LES UNITÉS ÉLÉMENTAIRES DE MATIÈRE SONT-ELLES ABSOLUMENT INERTES ?

La masse et le mouvement étant mutuellement inconvertisibles, la masse est absolument inerte. Elle ne peut mettre en mouvement une autre masse qu'en faisant passer tout ou partie de son mouvement dans cette autre masse. Or, comme le mouvement ne peut pas exister par lui-même, mais exige la masse à titre de substratum nécessaire, un tel passage ne peut avoir lieu à moins que les deux masses entre lesquelles il s'opère ne soient en contact. Toute action physique se produit donc par choc ; l'action à distance est impossible ; dans la nature, il n'y a pas traction,¹ il n'y a que poussée ; et toute force est non seulement, pour emprunter le langage de Newton, *vis impressa*, mais *vis a tergo*.

La nécessité de ramener toute action physique au choc a été constamment soutenue par les physiciens depuis la naissance des sciences physiques modernes. Cependant, ici encore, comme pour les cas discutés dans les deux chapitres précédents, la science se révolte contre ses hypothèses fondamentales. Le premier et le plus grand perfectionnement qu'elle ait reçu fut la réduction par Newton de tous les phénomènes des mouvements célestes au principe de la gravitation universelle, — à ce principe que tous les corps quelconques s'attirent mutuellement avec une force directement proportionnelle à leurs masses et inversement aux carrés de leurs distances.

Que la doctrine de la gravitation universelle, au sens d'at-

traction à distance sans l'intervention d'un milieu capable de propager des impulsions mécaniques, soit en désaccord avec les éléments de la théorie mécanique, c'est ce que personne ne sentit plus distinctement que Newton lui-même. Au début même de ses *Principia*, il se mit soigneusement en garde contre le reproche de considérer la pesanteur comme un attribut essentiel et inséparable de la matière, ou de croire que l'attraction mutuelle des corps soit un fait physique ultime. La force qui pousse les corps à se rapprocher du centre était pour lui, comme il le dit expressément, un concept purement mathématique ne renfermant aucune considération des causes réelles et physiquement primaires¹. Craignant évidemment que ce désaveu ne fût, après tout, perdu de vue, il le répéta, en termes non moins explicites, à la fin de son grand ouvrage. « La raison de ces propriétés de la pesanteur, dit-il, je n'ai pas encore pu la déduire ; et je ne construis pas d'hypothèses². » Si, après cela, il y avait encore place pour un doute quant aux opinions de Newton sur la nature de la pesanteur, il serait écarté par ce passage bien connu de sa troisième lettre à Bentley. « Il est inconcevable que la matière brute inanimée pût, sans la médiation de quelque autre chose qui n'est pas matériel, agir sur d'autre matière et l'affecter, sans contact mutuel, comme cela doit arriver si la gravitation, au sens d'Epicure, lui est essentielle et inhérente. Et c'est pour cela que je vous prie de ne pas m'attribuer la pesanteur innée. Penser que la pesanteur soit innée, inhérente, essentielle à la matière, de telle sorte qu'un corps pût agir sur un autre à distance, à travers un vide, sans l'intermédiaire de quelque substance par le moyen de laquelle leur action puisse être transmise de l'un à l'autre, c'est pour moi une absurdité si grande que je ne crois pas que jamais un homme ayant en matière philosophique une faculté de penser compétente, puisse jamais y tomber. La pesanteur doit être causée par un agent agissant constamment d'après certaines lois ;

1. « Mathematicus duntaxat est hic conceptus. Nam virium causas et sedes physicas jam non expendo. » *Princ.*, *Def.* VIII.

2. « Rationem vero harum gravitatis proprietatum nondum potui deducere, et hypotheses non fingo. » *Princ.*, *Schol. Gen. ad fin.* Le même désaveu est implicite dans les termes d' un scolie au 29^e théorème, prop 69, livre I, des *Principia*.

mais cet agent est-il matériel ou immatériel ? Je l'ai laissé aux réflexions de mes lecteurs ¹. »

D'autres preuves encore montrent que Newton regardait la gravitation universelle comme un phénomène secondaire, à expliquer par les principes du choc et de la pression ordinaires. Dans la dernière édition de son *Optique* il propose certaines « *Queries* » (problèmes) sur la possibilité de déduire quelques-unes des propriétés de la lumière des ondulations d'un éther répandu partout, et ajoute (Query 21) : « Ce milieu n'est-il pas beaucoup plus rare au sein des corps denses, du soleil, des étoiles, des planètes et des comètes, que dans les espaces célestes vides qui les séparent ? En passant de ces corps à de grandes distances, ne devient-il pas perpétuellement de plus en plus dense, et par là cause la pesanteur de ces grands corps à l'égard les uns des autres, et celle de leurs parties à l'égard de ces corps, chaque corps s'efforçant d'aller des parties les plus denses du milieu aux plus raréfiées ² ».

Malgré ces déclarations explicites, les contemporains de Newton s'alarmèrent de ce retour apparent des causes occultes dans le domaine de la physique. Il est intéressant de noter l'énergie avec laquelle les philosophes et les mathématiciens d'alors protestèrent contre l'hypothèse de l'action physique à distance. Huyghens n'hésite pas à dire que « le principe de l'attraction de Newton, lui paraît absurde ». Leibnitz l'appelait « un pouvoir incorporel et inexplicable » ; Jean Bernoulli, qui envoya à l'Académie de Paris deux essais, dans lesquels il chercha à expliquer les mouvements des planètes par une forme perfectionnée de la théorie cartésienne des tourbillons, dénonçait « les deux suppositions d'une faculté attractive et d'un vide parfait » comme « révoltantes pour des

1. *Newton's Works*, ed. S. Horsley, vol. IV, p. 438. Zöllner (*Principien einer electrodynamischen Theorie der Materie*, vol. I, préface) essaie de battre en brèche ce passage et d'autres écrits de Newton, mais, à ce qu'il me semble, tout à fait sans succès.

2. *Opticks*, 4^e édition, p. 325. Les « *Queries* » apparaissent pour la première fois dans la seconde édition de l'*Optique*, dans la préface de laquelle Newton dit encore : « Pour montrer que je n'ai pas pris la pesanteur pour une propriété essentielle des corps, j'ai ajouté une question sur sa cause, préférant cette forme de question parce que cela ne me satisfait pas, faute d'expériences ». J'ai déjà cité plus haut un semblable exposé des vues de l'illustre mathématicien anglais dans la lettre à Boyle.

esprits accoutumés à ne recevoir en physique que des principes incontestables et évidents ». Et le principe de l'action à distance ne trouva pas plus de faveur auprès des physiciens et des astronomes postérieurs. Euler observa que l'action de la pesanteur doit être due, soit à l'intervention d'un esprit, soit à celle de quelque milieu matériel subtil échappant à la perception de nos sens ; et il insistait, disant que cette alternative était la seule admissible, quoique la démonstration exacte de l'origine de la force de gravitation fût difficile ou impossible ¹. Son grand rival et adversaire, d'Alembert, rélégua la pesanteur dans cette classe de causes motrices dont la nature réelle nous est entièrement inconnue, par opposition à l'action par choc, dont nous avons une conception mécanique claire ². En dépit de l'assertion de John Stuart Mill et d'autres, que les penseurs de notre temps se sont émancipés du vieux préjugé contre l'*actio in distans*, il est aisé de montrer qu'il est presque, sinon tout à fait, aussi dominant aujourd'hui qu'il y a deux siècles. Pour ne citer que quelques exemples : Le Professeur Challis, qui a employé nombre d'années à s'efforcer d'établir une théorie hydro-dynamique complète de l'attraction, dit : « Il n'y a pas d'autre espèce de force que la pression par contact d'un corps sur un autre. Cette hypothèse repose sur ce principe : N'admettre aucune idée fondamentale qui ne puisse être rapportée à la sensation et à l'expérience. Il est vrai que nous voyons les corps obéir à l'influence d'une force externe, comme quand un corps descend vers la terre par l'action de la pesanteur ; quand nous en sommes informés par le sens de la vue, nous ne percevons dans de tels cas ni contact ni pres-

1. Euler, « *Theoria motus corporum solidorum* », p. 68. Voyez aussi ses « *Lettres à une princesse d'Allemagne* », n° 68, 18 octobre 1760.

2. D'Alembert, *Dynamique* (2^e édition), p. ix seq. On sait avec quelle lenteur, après quelles luttes la philosophie de Newton fut reconnue et acceptée en France, où le Cartésianisme régna sans conteste presque jusqu'à la fin du XVIII^e siècle. Ce que les Cartésiens pensaient généralement de l'action à distance de la gravitation peut être résumé d'après une note lue par Saurin à l'Académie des sciences en 1709, dont Edleston (*Correspondance entre Newton et Cotes*, p. 313) fait la citation suivante : « Il aime mieux considérer la pesanteur comme une qualité inhérente aux corps et ramener ces idées tant décriées de qualité occulte et d'attraction ». Si nous abandonnons les principes mécaniques (c'est-à-dire les principes de choc et d'impulsion mécaniques), continua-t-il, « nous voilà replongés de nouveau dans les anciennes ténèbres du péripatétisme dont le ciel veuille nous préserver ».

sion d'un autre corps. Mais nous avons aussi le sens du toucher ou de pression par contact — par exemple, de la main avec un autre corps — et nous sentons en nous-mêmes le pouvoir de causer le mouvement par une telle pression. La conscience de ce pouvoir et le sens du toucher donnent une idée distincte, que tout le monde comprend et prend pour règle, de la manière dont un corps peut être mù : cette règle de la philosophie qui fait de la sensation et de l'expérience personnelle, la base de la connaissance scientifique, comme elles sont la base de la connaissance qui règle les transactions communes de la vie, nous défend de reconnaître aucun autre mode. Donc, quand un corps est mis en mouvement sans contact apparent ni pression d'un autre corps, on peut aussitôt conclure que le corps qui presse, quoique invisible, existe, à moins d'être disposé à admettre qu'il y a des opérations physiques qui sont et seront toujours incompréhensibles pour nous. Cette admission est incompatible avec les principes de la philosophie que je défends, laquelle suppose que l'information des sens est suffisante, avec l'aide du raisonnement mathématique pour expliquer les phénomènes de toute espèce... Toute force physique étant pression, il doit y avoir un milieu par lequel la pression s'exerce¹. » Avec une égale vigueur, « l'hypothèse » de l'attraction universelle est réprouvée comme « une absurdité » par James Croll. « Aucun principe, prétend-il, ne sera jamais généralement admis, s'il est en opposition avec le vieil adage : « Une chose ne peut agir là où elle n'est pas », pas plus qu'il ne le serait, s'il était en opposition avec cet autre adage : « Une chose ne peut pas agir quand elle n'est pas encore ou quand elle n'est plus² ». Secchi proteste presque dans les mêmes termes. « Nous avons dit ailleurs, déclare-t-il, combien il est impossible de concevoir ce qu'on appelle une force attractive au sens strict du mot, c'est-à-dire d'imaginer un principe actif ayant son siège au sein des molécules et agissant sans intermédiaire, à travers un vide absolu. Cela équivaldrait à admettre que les corps

1. *On the fundamental Ideas of Matter and Force in Theoretical Physics*, Phil. mag., 4^e série, vol. XXXI, p. 467.

2. *On certain Hypothetical Elements in the Theory of Gravitation*, Phil. mag., 4^e série, vol. XXXIV, p. 450.

agissent l'un sur l'autre à distance, c'est-à-dire, là où ils ne sont pas : hypothèse absurde, — également absurde s'il s'agit de distance énormes et s'il s'agit de petites distances ¹. » Friedrich Mohr (qui paraît mériter l'honneur d'avoir énoncé distinctement le principe de la conservation de l'énergie, même avant Julius Robert Mayer) formule sa croyance scientifique dans un grand nombre de *Thèses* parmi lesquelles se trouve celle-ci : « La pesanteur ne peut agir que par l'interposition d'une matière pondérable ² ». De même E. Du Bois-Reymond : « Des forces agissant à travers un espace vide sont en elles-mêmes inconcevables, même absurdes, et sont devenues des concepts familiers aux physiciens depuis le temps de Newton, à cause d'une mauvaise interprétation de sa doctrine, et contrairement à ses propres protestations ³ ». Enfin, Balfour Stewart et P. A. Tait : « D'ailleurs, l'hypothèse d'action à distance peut être faite pour rendre compte de quelque chose ; mais il est impossible (comme Newton l'indiquait, il y longtemps, dans sa célèbre lettre à Bentley) pour quelqu'un « qui a en matière philosophique une faculté de penser compétente » d'admettre un instant la possibilité d'une telle action ⁴ ».

L'évidence la plus concluante, cependant, de la contradiction qui existe entre l'hypothèse d'attraction à distance et les concepts élémentaires d'action mécanique est dans le renouvellement incessant, par des hommes distingués, depuis le temps de Newton, des tentatives pour rendre compte des phénomènes de gravitation par la pression d'un fluide ou le choc d'un solide ⁵. Ces tentatives ont revêtu un intérêt extraordi-

1. *L'Unité des forces physiques*, etc. p. 532 seq.

2. « Nonnisi materia ponderabili interposita attractio agere potest. » *Geschichte der Erde*, appendice, p. 512.

3. *Ueber die Grenzen des Naturerkennens*, etc., p. 11.

4. *The Unseen Universe*, 3^e éd. (1873), p. 100.

5. Quelques-unes de ces tentatives sont fort bien discutées dans un mémoire récent, par William B. Taylor : « *Kinetic Theories of Gravitation* », *Smithsonian Report*, 1876. Bien que cet essai intéressant soit complet dans l'énumération des théories d'origine anglaise et française, il pourrait être complété par une collection de références aux articles et livres allemands sur le même sujet. Voyez éd. all., Schramm, « *Die allgemeine Bezeugung und Materie* », Vienne, 1872; Aurel Anderssohn, « *Die Mechanik der Gravitation* », Breslau, 1874 (contenant une photographie des résultats d'une expérience dans laquelle les effets de gravitation sont simulés par une balle flottante dans une eau agitée d'une série d'impulsions rayonnantes) ; *Zur Lösung des Problems über Sitz und Wesen der Anziehung* » — 47 *Versammlung deutscher Naturforscher und Aerzte zu Bres-*

naire par suite des résultats de certaines expériences du Professeur Guthrie, qui trouva que les corps légers suspendus près d'un disque en vibration étaient attirés vers lui « comme par une corde invisible » — phénomène qui, comme l'a indiqué Sir William Thomson s'explique par ce fait que dans un fluide en mouvement la pression est la moindre là où l'énergie moyenne du mouvement est la plus grande ¹.

Aux yeux de la physique moderne, tous les modes d'action qui paraissent se propager par rayonnement d'un centre sont des oscillations progressives dans des milieux élastiques. Il est donc naturel de chercher la cause physique de la gravitation dans le même sens. On a imaginé de nombreuses théories dans lesquelles la gravitation est rapportée au mouvement ondulatoire d'un fluide élastique interstellaire et interatomique semblable ou identique à l'éther qui transmet la lumière. La plus digne de remarque de ces théories est celle du Professeur Challis qui suppose que tout l'espace est rempli d'un éther en vibration qui est « un milieu élastique continu, parfaitement fluide, et ayant une pression proportionnelle à sa densité ». Challis est très désireux d'éviter l'accumulation des milieux hypothétiques, et s'efforce d'expliquer l'action gravitative comme un effet venant s'ajouter aux vibrations lumineuses et caloriques, ou comme un résidu de ces vibrations; il exécute pour cela des recherches analogues à celles de Daniel Bernouilli, qui essaya, il y a plus d'un siècle, de montrer que les mouvements relatifs des corps qui forment un système matériel sont composés d'oscillations

l'au, 1874; Hugo Fritsch, *Theorie der Newton'schen Gravitation und des Mariotte'schen Gesetzes*, Königsberg, 1874; Ph. Spiller, « *Die Urvkraft des Weltalls* », Berlin, 1876, etc. Il est un peu étrange que M. Taylor ait omis toute référence à la sérieuse « *Dissertatio de causa gravitatis* » de Huyghens (Hugenii, Opp. Reliqua, vol. I, p. 95 seq., Amstelod. 1728), aussi bien qu'à la non moins sérieuse théorie de P. A. Secchi, à laquelle allusion a été déjà faite dans le chapitre iv. Dans notre propre pays, le Professeur Pliny Earle Chase a largement contribué à ce genre d'ouvrages.

1. Les expériences de Guthrie avaient été devancées, à son insu, par Guyot, Schellbach et autres, comme on peut le voir par une communication de Guthrie lui-même au *Philosophical magazine* (4^e série, vol. XLI, p. 409 seq.). Des expériences semblables à celles d'Aurel-Anderssohn furent faites, il y a longtemps par Hooke et Huyghens, qui montrèrent l'un et l'autre que des corps, flottant sur l'eau agitée par des ondulations, étaient attirés vers le centre d'agitation. Cf. Hugenii, « *Diss. de causa gravitatis* », opp. reliqua, I, p. 99 seq.

simples, régulières et permanentes, de différentes espèces, mais il finit par suggérer qu'il peut y avoir un éther d'un ordre plus élevé « ayant la même relation avec le premier que celui-ci avec l'air, et ainsi de suite *ad libitum*; et que « la forme de la pesanteur est due à l'action attractive d'une molécule d'un ordre plus élevé quant à la grandeur que la molécule de l'attraction moléculaire ». J'aurai occasion, dans un chapitre subséquent de discuter la valeur scientifique de théories de cette espèce, dans lesquelles les faits ont expliqués par un nombre indéfini d'hypothèses arbitraires multipliées en raison des difficultés créées par les théories elles-mêmes; pour le moment, il suffit d'observer que toutes les théories hydro-dynamiques de la gravitation sont exposées à la fatale critique d'Arago. « Si l'attraction est le résultat de l'impulsion d'un fluide, son action doit employer un temps défini à traverser les immenses espaces qui séparent les corps célestes¹ » tandis qu'il n'y a plus aucune raison de douter que l'action de la gravité soit instantanée. S'il en était autrement, — si la pesanteur, comme la lumière ou l'électricité, était propagée avec une rapidité mesurable, — il y aurait nécessairement une composition de cette rapidité avec les vitesses angulaires des planètes résultant de leur accélération; la ligne apparente d'attraction serait dirigée vers un point situé en avant de la place réelle du soleil, de même que la position apparente du soleil est déplacée dans la direction du mouvement orbital de la terre, par suite de l'aberration de la lumière. Un tel effet, s'il existait aucunement, aurait été découvert depuis longtemps. Il y a eu un temps où l'action de la pesanteur était supposée progressive. Daniel Bernouilli attribuait la non-coïncidence des marées avec le passage de la lune au méridien à la lenteur comparative de la propagation de l'attraction; et plus tard, Laplace pensa un moment que l'accélération graduelle du mouvement moyen de la lune (reconnue d'abord par Halley en comparant les éclipses de lune modernes avec celles de Ptolémée et des astronomes arabes) pouvait s'expliquer en supposant que l'impulsion de la pesanteur se transmette avec une vitesse ne dépassant pas de moins de huit millions de fois celle de la lumière. Mais le retard des marées

i. *Astronomie populaire*, vol. IV, p. 119.

est maintenant reconnu comme une conséquence de l'inertie de l'eau, et des obstacles que rencontrent ses flots; l'accélération du mouvement de la lune, Laplace lui-même le montra bientôt, est due, en grande partie au moins, à la diminution séculaire de l'excentricité de l'orbite de la terre. Pour cette raison Laplace n'hésita pas à déclarer que, si l'action de la pesanteur se propageait dans le temps, sa vitesse devrait être au moins cinquante millions de fois plus grande que celle de la lumière. Il est vrai que la cause assignée par lui au phénomène a été trouvée depuis disproportionnée avec sa production. Une révision des calculs de l'astronome français par M. Adams, il y a quelques années, montra que la diminution de l'excentricité de l'orbite de la terre pouvait tout au plus produire une accélération lunaire de six secondes dans un siècle, au lieu de dix secondes, chiffre de l'accélération supposée par Laplace, et de plus que l'accélération montait en réalité à près de douze secondes. Une part du phénomène doit donc être attribuée à d'autres causes; et c'est ce qu'on a fait avec succès en montrant qu'il dépend du retard périodique du mouvement diurne de la terre, ce qui occasionne une accélération apparente du mouvement moyen de la lune.

Il y a ainsi un manque complet d'analogie, sous ce rapport, entre l'action de la pesanteur et les autres modes connus de l'action physique qui sont rapportés à des ondulations de l'éther, tels que la lumière, la chaleur rayonnante et l'électricité, qui toutes se propagent avec une vitesse définie. De plus, comme M. Taylor l'a observé, d'autres traits de la gravitation font naître la présomption qu'elle est d'une nature essentiellement différente de celle des autres formes de l'action rayonnante. L'action de la pesanteur n'est nullement susceptible d'être interrompue par l'interposition d'un obstacle, ou, comme l'a dit Jevons ¹, « tous les corps y sont, pour ainsi dire, absolument transparents », sa direction est en ligne droite entre les centres des masses qui s'attirent, et n'est pas sujette à réflexion, réfraction ni composition; contrairement aux formes de cohésion, capillarité, affinité chimique et attraction électrique ou magnétique, elle est incapable d'épuisement, ou plutôt de saturation, tout corps attirant un autre

1. *Principles of science*, vol. II, p. 144.

corps quelconque proportionnellement à sa masse ; elle est tout à fait indépendante de la nature du volume, ou de la structure des corps entre lesquels elle se manifeste, et son énergie est invariable, incessante et inépuisable.

En somme, on peut dire en toute sûreté que les ondulations d'un éther cosmique supposé ne peuvent offrir une base satisfaisante pour une théorie physique de la gravitation, et que, si une telle théorie doit être imaginée, il faut avoir recours aux analogies de la théorie cinétique récemment introduite dans la science de la thermo-dynamique. C'est ce qu'admettent très franchement les princes de la physique actuelle. « Toutes les tentatives faites, disent Stewart et Tait ¹, pour rattacher la gravitation à l'éther lumineux, ou au milieu servant à expliquer les actions électriques et magnétiques à distance, ont complètement échoué, de sorte que nous sommes apparemment ramenés à la théorie du choc comme à la seule possible. » La seule théorie du choc sérieusement discutée par les physiciens et les astronomes modernes est celle de Le Sage ² ; la voici, résumée en quelques mots : L'espace est constamment traversé dans toutes les directions par des courants de corps infiniment petits, se mouvant avec une vitesse presque infinie et venant de régions inconnues de l'univers. Ces corps sont appelés « corps ultramondains ». En raison de leur petitesse, ils se choquent rarement ou jamais, et la plus grande part d'entre eux trouvent facilement passage à travers les corps sensibles ordinaires, de sorte que toutes les parties de ces corps — celles de l'intérieur aussi bien que celles de la surface — sont également capables d'être frappées par les corpuscules, la force du choc étant ainsi proportionnelle, non aux surfaces, mais aux masses des corps. Un corps élémentaire ou une molécule serait également battue par ces corpuscules dans tous les sens ; mais deux corps quelconques agissent mutuellement comme écrans, de

1. *The Unseen Universe*, § 140.

2. Arago suggère (*Astron. pop.*, IV, p. 118) que la théorie de Le Sage est simplement une reproduction, sous une forme perfectionnée, des idées systématiques de Fatio de Duillers (le stupide et indiscret partisan de Newton dans sa controverse avec Leibnitz sur la priorité de l'invention du calcul différentiel) et de Varignon, qui avaient été communiquées à Le Sage avant leur publication. Mais c'est probablement une erreur ; les spéculations de Varignon, au moins, étaient analogues à celles de Newton dans la 21^e Query de son *Optique*.

sorte que chacun reçoit un moins grand nombre de chocs du côté qui regarde l'autre. Par conséquent ils sont attirés l'un vers l'autre. Le mouvement des corpuscules étant rectiligne dans toutes les directions, la diminution de pression qui en résulte est inversement proportionnelle aux carrés des distances entre les corps affectés.

Avec tout le respect dû à l'autorité des hommes de science qui ont soutenu cette théorie, il faut dire que l'étrangeté des hypothèses qu'elle suppose la caractérise tout d'abord comme un reste des fantaisies d'un âge dans lequel les fonctions d'une théorie scientifique étaient imparfaitement comprises. Sa parenté intellectuelle avec les anciens tourbillons et les circulations harmoniques saute aux yeux. Elle ignore complètement la nécessité de rendre compte de l'origine de l'énergie énorme constamment déployée par les prétendus courants des corpuscules ultramondains ; l'agent supposé, et le mode de son action échappent l'un et l'autre à l'expérience ; et il est douteux que ces suppositions, si elles pouvaient être confirmées, servissent à expliquer tous les caractères, ou quelques-uns des caractères de la gravitation, en présence desquels, comme nous l'avons vu, toute théorie hydro-dynamique est condamnée à échouer. La frivolité de la théorie de Le Sage est manifestée de la façon la plus frappante par Clerk Maxwell¹ qui l'éprouve par le principe de la conservation de l'énergie. Si les corpuscules ultramondains heurtant les corps sensibles sont parfaitement élastiques et rebondissent avec la même vitesse qu'ils avaient en s'approchant, ils « emporteront leur énergie avec eux dans les régions ultramondaines ». Dans ce cas « les corpuscules rebondissant du corps dans une direction donnée quelconque seront en même nombre et auront la même vitesse que ceux qui sont empêchés d'aller dans cette direction parce qu'ils sont réfléchis par le corps, quels que soient la forme et le nombre des corps qui sont dans le champ ».

Dans ce cas donc, il n'y a pas d'action gravitative. Si, d'autre part, les corpuscules sont inélastiques ou imparfaitement élastiques — puisque l'action de la pesanteur est supposée due à la différence comparativement petite entre les

1. *Encyclopædia britannica*, au mot « Atom ».

chocs sur les côtés opposés du corps, — à tout moins l'énergie des chocs qui se font équilibre (partiellement ou totalement selon le degré d'élasticité du corpuscule), doit se convertir en chaleur, et « la quantité de chaleur ainsi engendrée élèverait en quelques secondes le corps, et de la même manière tout l'univers matériel, à la température du blanc ¹ ».

Ainsi, encore une fois, la science est en conflit irréconciliable avec un des postulats fondamentaux de la théorie mécanique. L'action à distance, dont la théorie est contrainte d'affirmer l'impossibilité, demeure un fait ultime inexplicable par les principes du choc et de la pression des corps en contact immédiat. Et ce fait est le fondement de la construction théorique la plus magnifique que la science ait jamais érigée, — fondement qui s'enfonce plus avant avec chaque nouvelle conquête de notre vision télescopique, et s'élargit avec chaque progrès de l'analyse mathématique.

1. M. S. Tolver Preston a récemment (*Phil. Mag.*, sept. et nov. 1877, et février et mai 1878) proposé une modification de la théorie de Le Sage. Il essaie de se dispenser du caractère ultramondain de ses corpuscules et de rendre compte de la gravitation avec le postulat de la théorie cinétique des gaz seulement. Sa théorie est fondée sur l'hypothèse que « la portée de la gravité est limitée », et que « les étoiles se meuvent en ligne droite et non en orbites ». En présence de ces hypothèses et de ma discussion de la théorie cinétique des gaz dans un chapitre spécial, je ne crois pas nécessaire d'y consacrer ici aucune place.

CHAPITRE VI

TOUTE ÉNERGIE POTENTIELLE EST-ELLE EN RÉALITÉ CINÉTIQUE? — HISTOIRE DE LA DOCTRINE DE LA CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

D'après la théorie mécanique, le mouvement, comme la masse, est indestructible et invariable; il ne peut pas disparaître et reparaitre. Tout changement dans sa qualité résulte de sa distribution dans un nombre plus grand ou plus petit d'unités de masse. Et, le mouvement et la masse étant inconvertisibles l'un à l'autre, le mouvement seul peut être la cause du mouvement. Il n'y a donc pas d'énergie potentielle; toute énergie est en réalité cinétique.

La connexion logique étroite de cette proposition avec celle qui a été discutée dans le dernier chapitre, est évidente, et n'a pas échappé à l'observation des princes de la physique. Stewart et Tait, après avoir rendu compte de l'hypothèse de Le Sage, qui, dans leur opinion, contient les rudiments au moins de la seule théorie physique soutenable de la gravitation, ajoutent : « Si la théorie de Le Sage, ou tout autre analogue, est une représentation du mécanisme de la gravitation, un coup fatal est porté à cette forme tranquille de force motrice que nous avons appelée énergie potentielle. Non pas qu'il cesse d'y avoir une profonde différence spécifique entre elle et l'énergie cinétique ordinaire, *mais* TOUTES DEUX seront désormais regardées comme cinétiques¹ ». Cette déclaration

1. *The Unseen Universe*, § 142.

a été récemment répétée par le Professeur Tait, dans sa leçon sur la Force ¹.

La proposition soulignée ici est irrécusable pour tout défenseur conséquent de la théorie mécanique; mais en revanche, la science moderne lui refuse péremptoirement son assentiment. Elle affirme que tous ou presque tous les changements physiques dans l'univers sont des conversions d'énergies cinétiques en énergies potentielles et réciproquement; — cette énergie est incessamment emmagasinée comme pouvoir virtuel et restituée comme mouvement actuel. Quand l'extrémité d'un pendule ordinaire descend de son plus haut point à son plus bas, son énergie potentielle diminue proportionnellement à l'accroissement de son mouvement actuel; quand il remonte, son énergie de mouvement disparaît dans la même proportion jusqu'à son arrivée au point le plus élevé en face du premier, où il reste un instant immobile, toute son énergie étant due à sa position. Ces conversions et reconversions de deux formes d'énergie sont le type des oscillations supposées des atomes ou molécules ultimes aussi bien que des révolutions orbitales des grands corps qui composent un système planétaire. Une planète se mouvant selon un orbite excentrique gagne de l'énergie de mouvement en approchant du soleil et la reperd dans la même proportion en s'en éloignant. La même transformation mutuelle se manifeste dans un autre vaste domaine des phénomènes physiques : l'action due à l'affinité chimique. Un morceau de charbon reste enseveli un million d'années dans la terre; durant tout ce temps, il n'y a pas de changement dans sa position relativement aux objets environnants, ni dans les positions relatives de ses parties — il est privé de mouvement externe ou interne (excepté celui qu'il partage avec la planète dont il fait partie); nous l'apportons à la surface du sol, dans l'atmosphère contenant de l'oxygène et en contact avec une flamme; son pouvoir latent pour la première fois devient sensible — il brûle, donnant naissance à une action vigoureuse qui se manifeste par de la lumière et de la chaleur. La tendance de la science moderne est de ramener tout changement physique à un petit nombre de formes primaires de l'énergie potentielle, dont les princi-

1. *On some recent advance in Physical science*, 2^e éd., p. 262 et 263.

pales sont la pesanteur et l'affinité chimique. Dans l'opinion des physiciens modernes, la seule théorie plausible émise jusqu'ici, de l'origine des systèmes stellaires et planétaires est celle connue sous le nom d'hypothèse de la nébuleuse. Que nous en adoptions la forme si connue que lui ont donnée Kant et Laplace, ou une de ses modifications plus récentes, dans l'un et l'autre cas, toutes les forces des masses, sinon les forces moléculaires de l'univers, sont dérivées en dernière analyse de l'attraction due à la position pure et simple des particules originelles supposées diffuses uniformément dans l'espace. Et tous les changements dans les formes relativement petites, organiques ou inorganiques, sont rapportées, au moins approximativement, en physiologie comme en physique, aux affinités des éléments chimiques.

En réalité, la science moderne enseigne que la diversité et le changement dans les phénomènes de la nature ne sont possibles qu'à la condition que l'énergie de mouvement puisse être emmagasinée comme énergie de position. La concrétion relativement permanente des formes matérielles, l'action et la réaction chimiques, la cristallisation, l'évolution des organismes végétaux et animaux — tout dépend de l'emprisonnement de l'action cinétique sous la forme d'énergie latente. — Pour éclaircir ce point, pour montrer que l'effort fait pour abolir la distinction entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle reste sans succès, il sera utile de retracer brièvement l'histoire de la doctrine de la conservation de l'énergie.

Dans un sens général, cette doctrine remonte à l'aurore de l'intelligence humaine. Elle n'est rien de plus qu'une application de ce principe simple : rien ne peut venir de rien ¹.

1. On peut véritablement affirmer que l'intelligence humaine commence et finit avec le principe ci-dessus formulé. Quand tous les changements phénoménaux de l'univers auront été réduits au seul principe de la conservation de l'énergie, le temps sera venu de célébrer la consommation finale des sciences physiques, dans un nouveau poème « *de verum natura* » ; et au premier chapitre on pourra de nouveau écrire ces paroles de Lucrèce :

... res... non posse creari

De nihilo, neque item genitas in nil revocari. •

Il est curieux de remarquer l'unanimité et l'insistance avec lesquelles les anciens philosophes grecs déclarent que rien ne peut absolument naître ou périr — c'est la forme rudimentaire de la loi de causalité. Diogène d'Apollonie déclara : « οὐδὲν ἐκ τοῦ μηδενος γίνεσθαι » (Diog. Laert., IX, 57) ; Parménide : « ὅς

Mais l'histoire de son développement et de son application aux sciences physiques, commence avec son expression catégorique dans les *Principia philosophiæ* de l'inventeur du système des tourbillons cosmiques¹.

ἀγένετον ἔδν καὶ ἀνώλεθρόν ἐστιν » (Karsten, Rel., V, 88); Empédocle : « ἐκ τοῦ γὰρ μὴ ἔδντος ἀμύχανον ἐστὶ γενέσθαι » (Karsten, V, 48); Démocrite : « μηδὲν τ' ἐκ τοῦ μὴ ἔδντος γίνεσθαι καὶ εἰς τὸ μὴ ἔδν φθίρεισθαι » (Diog. Laert., IX, 44). La première application de ce principe au mouvement fut faite par Epicure (Diog. Laert., liv. X; Lucret. « *de Rer. nat.* » v. 294-307), qui chercha à démontrer la conservation et de la masse et du mouvement par cet argument qu'il n'y a pas de lieu au-delà de l'univers auquel la matière et le mouvement pourraient être communiqués, ou duquel ils pourraient être dérivés — argument qui fut reproduit par Leibnitz (Opp. Math., vol. VI, p. 440. — Cf. Berthold « *Notizen* », etc., in Pogg. Ann., vol. CLVII, p. 342), et qui est en effet une pénétrante anticipation du concept moderne d'un « système conservatif ». Une exposition élaborée de doctrines d'Epicure a été donnée par Gassendi (« *Ad librum decimum Diogenis Laertii notæ* », Opp. ed. Lugd., vol. III, p. 241. seq.). Il n'est pas improbable que cette exposition ait influé sur les méditations de Descartes, malgré la profonde divergence de ses tendances philosophiques avec celles de Gassendi.

1. Descartes a été appelé le père de la philosophie moderne; on pourra aussi justement l'appeler le père de la physique moderne. Ses titres aux honneurs de la paternité en philosophie, non moins qu'en physique, doivent trouver un autre soutien que la découverte, ou même l'expression exacte, de vérités d'une valeur durable. Peu de ses doctrines philosophiques ont subsisté, au moins sous la forme qu'il leur a donnée, et quelques-unes des vérités qu'il a rejetées sont maintenant comptées parmi nos richesses les plus indispensables. Comme physicien, il a émis nombre de théories qui se sont trouvées complètement dénuées de fondement, et il a ignoré ou mal compris presque toutes les lois de l'action mécanique dont la découverte est la gloire de son contemporain et aîné, Galilée. En philosophie, il fut le père immédiat de Spinoza, dont le système, bien qu'en fait il soit une réduction à l'absurde de toute spéculation ontologique, a servi, grâce à la précieuse élégance de ses paralogismes pseudo-mathématiques, à retarder avec une force incalculable la découverte des vrais principes de la recherche philosophique. En physique, ses erreurs ont obscurci le champ de la recherche à un degré tel que ces ombres ne sont pas encore complètement évanouies aujourd'hui. Tout en professant de s'émanciper des traditions métaphysiques de la période qui était alors près de sa fin, il était complètement imbu de leur esprit. Mais, précisément pour cette raison, ses écrits ont influé sur la pensée du XVII^e siècle plus que les recherches de ceux qui avaient recours aux méthodes scientifiques d'expérimentation et d'observation, méthodes qui étaient en opposition complète avec les habitudes d'esprit du temps. C'était essentiellement un métaphysicien, un ontologiste du genre de ceux du moyen-âge; mais il a discuté presque tous les problèmes dont la solution fut la tâche des physiciens et des mathématiciens des deux siècles qui suivirent son temps. Ainsi ses spéculations, quoique vaines par elles-mêmes en général, devinrent le ferment qui fit naître le développement de clarification graduelle dans le mélange rapidement épais de la matière scientifique. Bien que ce ferment ait été complètement détruit dans le développement de son action, il n'en était pas moins important.

En disant tout ceci, je n'ai l'intention de rien retirer à l'admiration due à la vigueur et à la pénétration de son esprit; je n'oublie pas non plus qu'il est l'in-

Descartes énonçait la doctrine de la conservation du mouvement en termes parfaitement explicites. Il déclarait que Dieu était le premier moteur, et qu'il conservait toujours dans le monde la même quantité de mouvement¹. Si son hypothèse que les seules propriétés primaires de la matière sont l'étendue et le mouvement ne l'avait empêché d'admettre la constitution atomique de la matière, il aurait, sans doute, affirmé la conservation du mouvement dans le sens qui est généralement attribué de notre temps au principe de la conservation de l'énergie par les personnes qui n'ont pas de culture scientifique : à savoir que les atomes dont le monde matériel est composé sont perpétuellement animés d'un mouvement uniforme de translation et d'oscillation, ne changeant que de direction, ou que, s'ils se meuvent avec des vitesses différentes, la somme de ces vitesses est constante. En raison de sa théorie physique générale, Descartes fut contraint de recourir, non à l'atome — l'unité primordiale de masse supposée, dont il niait l'existence — mais à la masse en général; et la conservation du mouvement dans son système prit la forme d'une conservation de la quantité de mouvement, c'est-à-dire de la somme des produits de toutes les masses par leurs vitesses respectives². Il est à remarquer que le terme « quantité de mouvement », désignant le produit d'une masse par sa vitesse (c'est-à-dire le

venteur de la géométrie analytique. Et il n'est pas nécessaire, je pense, d'ajouter que, tout en donnant franchement l'expression de mon opinion sur la valeur du système philosophique de Spinoza, je ne suis pas étranger à l'émotion que l'on ressent toujours quand on se représente la touchante figure de ce penseur solitaire, et que je ne suis pas insensible aux charmes de beauté simple d'une vie qui, plus parfaitement peut-être qu'aucune autre, est un exemple de la définition des Tusculanes : *Vivere et cogitare*.

1. « Generalcm (motus causam) quod attinet, manifestum mihi videtur illam non aliam esse quam Deum ipsum qui materiam simul cum motu et quiete in principio creavit, jamque per solum suum concursum ordinariam, tantumdem motus et quietis in ea tota, quantum tunc posuit, conservat. » *Princ. phil.*, II, § 36. La doctrine est formulée, en substance dans les mêmes termes, dans plusieurs autres parties du même ouvrage, ed. all., II, § 42; III, § 46.

2. On voit d'une manière frappante combien les notions mécaniques de Descartes étaient vagues dans ses efforts pour les concilier avec sa troisième loi du mouvement, d'après laquelle un corps ne perd pas de mouvement dans une collision avec un corps « plus fort » : — « ubi corpus quod movetur alteri occurrit, si minorem habeat vim ad pergendum secundum lineam rectam quam hoc alterum ad ei resistendum, et motum suum retinendo solam motus determinationem amittit; si vero habeat majorem, tunc alterum corpus secum movet ac quantum ei dat de suomotu, tantumdem perdit. » *Princ. Phil.*, II, § 40.

STALLO.

4

moment mathématique) fut adopté par Newton, et s'est maintenu dans la physique jusqu'à aujourd'hui.

Il est manifeste que la conservation du mouvement comme une quantité absolue dans le sens populaire (c'est-à-dire en réalité, une conservation des vitesses), ne serait possible que dans un monde sans différences de densité ni de structure. Si le mouvement était conservé dans ce sens, il ne pourrait y avoir ni diversité, ni changement dans les phénomènes. Dans l'univers tel que nous le connaissons, avec ses incessantes transformations, le principe supposé de la conservation du mouvement ne peut avoir aucune application. C'est ce que vit, obscurément au moins, Leibnitz, qui nia la conservation du mouvement au sens cartésien. Sa dénégation trouva son expression la plus précise dans un essai intitulé : « Courte démonstration de la mémorable erreur de Descartes et autres sur la loi de la nature d'après laquelle ils prétendent que Dieu conserve toujours la même quantité de mouvement, et dont ils font aussi abus en mécanique¹. » A la doctrine cartésienne de la conservation de mouvement il opposa le principe de la conservation de la *force vive* — du produit de la masse par le carré de la vitesse.

Telle fut l'origine de la fameuse controverse entre les Leibnitziens et les Cartésiens sur la vraie mesure des forces de l'univers, controverse qui mit aux prises tant de mathématiciens et de philosophes, et à laquelle Kant fit une contribution tardive et peu justifiée. Le débat a été clos depuis longtemps d'une manière définitive; mais il est si important, pour le but que je me propose d'atteindre, d'éclaircir les conceptions fausses qui prévalent sur le véritable sens de la conservation de l'énergie, que je lui consacre quelques instants d'étude.

La force, au sens ordinaire du mot (c'est-à-dire, la cause du mouvement, ou plutôt l'ensemble de toutes ses conditions), se mesure simplement par la vitesse d'une unité de masse. Ainsi la force et la masse se mesurent l'une par l'autre. Deux forces sont égales quand elles engendrent des mouvements égaux

1. « Brevis demonstratio erroris memorabilis Cartesii et aliorum circa legem naturæ, secundum quam volunt a Deo eandem semper quantitatem motus servari, qua et in re mechanica abutuntur. » *Acta Erud.*, Lips. 1686 (Leibn, *opp. math.*, vol. VI, p. 117).

(ou, d'une façon plus générale, des accélérations égales) dans des masses égales; et deux masses sont égales quand elles reçoivent des accélérations égales sous l'action de forces égales. Quand le mouvement d'une unité de masse est distribué entre plusieurs unités, le mouvement de chaque unité diminue proportionnellement au nombre des unités entre lesquelles il est distribué. La vitesse (ou accélération) d'un corps est donc en raison directe de la force et en raison inverse de la masse. — Dans le cas de forces constantes produisant des accélérations uniformes, les vitesses sont naturellement proportionnelles aux temps de l'action.

Nous avons donc

$$\text{vitesse} = \frac{\text{force}}{\text{masse}} \times \text{temps de l'action}$$

ou

$$\text{masse} \times \text{vitesse} = \text{force} \times \text{temps de l'action}^{\frac{1}{2}};$$

c'est-à-dire, la force exercée pendant un temps donné est égale au produit de la masse par la vitesse. D'autre part, l'espace ou la distance que parcourt un corps sous l'action d'une force constante, est, comme la vitesse, en raison directe de la force et en raison inverse de la masse; mais, contrairement à la vitesse, il est proportionnel, non seulement au temps, mais à la moitié du carré du temps de l'action. D'où

$$\text{espace ou distance de l'action} = \frac{\text{force}}{\text{masse}} \times \frac{1}{2} (\text{temps de l'action})^2;$$

ou (comme, d'après la première équation,

$$\text{temps de l'action} = \frac{\text{masse} \times \text{vitesse}}{\text{force}}),$$

$$\frac{1}{2} \text{masse} \times \text{vitesse}^2 = \text{force} \times \text{distance de l'action}^2.$$

Le premier terme de la dernière équation, — le produit de la masse par la moitié du carré de la vitesse — est la *vis visà* de Leibnitz, et s'appelle aujourd'hui énergie cinétique¹.

On voit que la première formule (Descartes) indique la mesure d'une force donnée *agissant pendant un temps donné*, tandis que la seconde (Leibnitz) contient la mesure de la force *agissant à travers un espace donné*. Il n'y a pas

1. Leibnitz et ses contemporains désignaient le produit *total* de la masse par le carré de la vitesse par les mots *vis viva*; mais cela n'est correct que quand la mesure des forces est formulée sous la forme d'une proportion.

contradiction entre les deux ; au contraire, l'une est un corollaire de l'autre. Et cependant la discussion a un intérêt à cause de cette doctrine cartésienne — restée aussi tenace qu'imaginaire, dans beaucoup d'esprits — que la force, au sens de montant de la production ou de la translation d'une quantité de mouvement, est conservée, et que les *moments* pendant deux espaces de temps égaux quelconques sont les mêmes. A la lumière de la science moderne, rien n'est d'une fausseté plus démontrable que la doctrine de la conservation du mouvement telle qu'elle fut soutenue par Descartes. Néanmoins il y a un sens dans lequel la quantité de mouvement — ou ce qu'aujourd'hui l'on appelle ordinairement *moment* — est constante dans les actions mutuelles des corps composant un système matériel. Le *moment* étant le produit de la masse par la vitesse, et la vitesse étant nécessairement dans une direction définie, il résulte de la troisième loi de Newton, — l'action et la réaction sont égales et opposées, ce qu'on appelle force étant toujours un aspect de l'action mutuelle égale et opposée de deux corps — comme Newton lui-même l'a montré, que le *moment* d'un système quelconque de corps, c'est-à-dire la somme de leurs quantités de mouvement, dans quelque direction que ces quantités soient mesurées, n'est jamais changée par leur action mutuelle. Tout *moment* acquis par une partie du système est perdue par une autre dans la même direction. De là résulte cet important principe dynamique (énoncé dans le quatrième corollaire des lois du mouvement, de Newton) que le centre d'inertie d'un système de corps est indépendant de leur action mutuelle.

Pour interpréter la proposition cartésienne dans son application à l'univers considéré comme un simple système conservatif, de façon à la rendre conforme aux faits, il serait nécessaire de prendre une direction une et fixe et d'y projeter tous les mouvements des corps constitutifs ou particules — en d'autres termes, de considérer les composantes effectives comme représentées par les cosinus des angles formés par les diverses directions et la direction fixe à laquelle on les rapporte. Cela fait, la somme des *moments*, c'est-à-dire des produits de toutes les masses par leurs vitesses dans la direction indiquée serait constant ; il est bien entendu que, si le mouvement dans une direction est pris comme positif, le mouvement dans la

direction contraire (et par suite aussi le *moment* dont il est facteur) est négatif¹.

Quoique le mérite d'avoir formulé le principe de la conservation de la force vive appartienne à Leibnitz, la première formule claire de la relation entre ce principe et celui de la conservation du *moment* est due à Huyghens, et est en ces termes : La quantité du mouvement qu'ont deux corps se peut augmenter ou diminuer par leur rencontre ; mais il y reste toujours la même quantité vers le même côté, en soustrayant la quantité du mouvement contraire... La somme des produits faits de la grandeur de chaque corps dur multiplié par le carré de sa vitesse est toujours la même devant et après la rencontre². »

Le progrès fait jusqu'ici, dans la rectification de la doctrine cartésienne, consiste dans la négation de la conservation du mouvement au sens de simple vitesse ou de quantité de mouvement et valeur du changement indépendamment de sa direction, et dans l'affirmation de la conservation de l'*énergie* de mouvement — quantité proportionnelle au produit de la masse par le carré de la vitesse. Tel était l'état de la question au temps de Newton.

Le principe leibnitzien aurait pu, même à cette époque (toutes les prémisses étant données dans les lois du mouvement de Newton, et spécialement dans son interprétation de

1. On dit quelquefois que des quantités de mouvement se détruisent ou se neutralisent partiellement ou totalement, comme dans le cas de la collision centrale de deux corps se mouvant avec des vitesses égales dans des directions diamétralement opposées ; les corps, après le choc, sont alors en repos, et le moment qui en résulte est égal à 0. Mais les moments des deux corps étant égaux et opposés, et, par suite, leur somme étant celle de deux quantités égales dont l'une est positive et l'autre négative, celle-ci était aussi égale à 0 avant le choc, de sorte que ce cas n'est pas une exception à cette règle que les moments de deux corps qui se heurtent ne sont pas altérés par leur choc mutuel.

2. Cf. Aikin : *On the History of Force*, *Phil. Mac.*, 4^e série, vol. XXVIII, p. 472. Le Professeur Bohn (*ib.*, p. 313), réclama pour Bernouilli l'honneur d'avoir donné la première exposition claire du principe de la conservation de la *vis viva* ; mais l'étude des passages cités par lui montrera que la conception de Bernouilli reposait sur la supposition métaphysique de la substantialité du mouvement et de l'égalité de la cause et de l'effet. En réalité, Jean Bernouilli a adopté ce principe sous la forme et d'après les considérations présentées par Leibnitz, qui, comme Descartes, était plutôt un métaphysicien qu'un physicien, tandis que Huyghens, véritable homme de science, arrivait à ses propositions par une série de généralisations de cas spéciaux.

la troisième loi), être généralisé de façon à embrasser ou à impliquer non seulement la conservation de la force vive, mais aussi le principe des vitesses virtuelles, la conservation du *moment* (y compris le *moment* angulaire) et le principe moderne de la conservation de l'énergie. La formule aurait été celle-ci : Ni le *moment*, ni l'énergie d'un système de corps n'est changé par leurs actions mutuelles. Il est manifeste qu'il n'y a là rien de plus qu'une extension du principe d'inertie d'après lequel un corps, qu'on le considère comme simple ou comme composé de parties, ne peut se mouvoir lui-même, c'est-à-dire, ne peut produire aucun changement dans son état de repos ou de mouvement uniforme total.

La science moderne a formulé nombre de concepts pour faciliter l'intelligence des lois qui règlent les changements dans la condition des agrégats matériels. Traitant chaque corps sensible comme un système d'unités de masse, elle définit le *travail* un changement dans la configuration d'un tel système par opposition aux forces qui lui résistent, et *énergie* la capacité de produire du travail. Toutes les fois qu'un tel système est considéré comme étant sous l'action exclusive des forces mutuelles de ses unités constitutives, c'est-à-dire, quand il ne reçoit pas l'action d'un autre système, ni n'agit sur aucun autre, on l'appelle « système conservatif ». En fait il n'y a pas de système matériel limité qui soit dépourvu de toute action mutuelle avec les corps ou les systèmes qui l'entourent, et pour cette raison un « système conservatif » est plus exactement défini un groupe de corps qui, en passant par un cycle quelconque de changements de configuration, produit au dehors autant de travail qu'il en reçoit, de sorte que l'énergie qui vient des corps extérieurs est compensée par une quantité égale d'énergie communiquée aux corps extérieurs. Si maintenant nous exprimons le principe de la conservation de la force vive aux termes de ces concepts, il prend la forme suivante : Dans toute série de changements dans la configuration d'un système conservatif, son énergie actuelle (énergie de mouvement ou *force vive* — appelée maintenant *énergie cinétique*) est la même toutes les fois que la configuration est la même, c'est-à-dire toutes les fois que ses unités constituantes sont dans les mêmes positions relatives, quels qu'aient été leurs orbites et leurs vitesses en passant d'une configuration

à l'autre. Le vrai sens de cette proposition paraîtra mieux en considérant le cas simple des oscillations du pendule, qui, depuis Galilée, a toujours servi d'exemple dans l'étude des lois mécaniques. La masse du pendule change de vitesse à chaque point; mais les vitesses aux points également distants du point de vitesse maxima sont égales¹. Un cas encore plus simple est celui d'un corps jeté dans une direction verticale ascendante et revenant au point de départ; dans son ascension il est retardé, et dans sa descente, accéléré (en ne tenant pas compte de la résistance de l'air), par l'action constante de la pesanteur; mais aux mêmes points les vitesses d'ascension et de descente sont les mêmes. Un exemple semblable (le même au fond), est celui des corps célestes, se mouvant dans des orbites elliptiques; — en faisant toujours abstraction des causes qui altèrent la stricte périodicité de leurs mouvements — ils ont les mêmes énergies de mouvement aux mêmes points, ou aux points symétriques de leurs orbites. Tous ces exemples sont des cas de mouvement varié (uniformément accéléré ou retardé); quand le mouvement est uniforme, la loi de conservation est simplement le principe bien connu des vitesses virtuelles.

On le voit, la question qui vient naturellement après celle-là est celle-ci : quelle est la loi de l'énergie si l'on ne considère pas le cycle complet des changements de configuration — pendant le passage du système d'une configuration quelconque prise pour point de départ à une autre quelconque, et pendant son retour de celle-ci à la configuration initiale? La réponse à cette question, qui n'a pris une forme définie que très récemment, constitue l'expression vraie et complète de la doctrine de la conservation de l'énergie. La voici : Dans toute série de changements dans la configuration d'un système conservatif la somme de ses énergies cinétique et potentielle (c'est-à-dire l'énergie actuelle du système à un moment donné plus le travail accompli en passant de la configuration initiale à la configuration à ce moment) est constante — le travail accompli étant emmagasiné comme pouvoir de reproduire la configuration initiale et ainsi de restituer l'énergie actuelle perdue.

1. Ceci, d'ailleurs, n'est strictement vrai que d'un pendule idéal, oscillant dans le vide et sans frottement.

Littéralement, cette expression du principe s'applique seulement aux cas où le travail est accompli en opposition avec les forces du système, comme par exemple, lorsqu'un corps est projeté en haut contre l'action de la pesanteur, — par conséquent, lorsque l'énergie cinétique est emmagasinée comme énergie potentielle. Au contraire, toutes les fois que de l'énergie cinétique est restituée et que de l'énergie potentielle est perdue, comme dans le cas d'un corps qui tombe, la formule doit être modifiée de façon à affirmer que la somme obtenue en ajoutant l'énergie cinétique due à une configuration donnée au travail *qu'il faudrait* pour reproduire la configuration initiale là où l'énergie potentielle est à son maximum, est constante. Dans de tels cas l'expression mathématique de l'énergie potentielle sous forme de travail est négative. Dans son application à l'énergie de l'univers (qui est nécessairement un système conservatif, puisqu'il n'y a pas de corps en dehors de lui) la loi de la conservation est celle-ci : L'énergie cinétique de l'univers, plus le travail que devraient faire les forces mutuelles de ses éléments constituants pour les porter jusqu'à la limite d'épuisement de l'action de ces forces, c'est-à-dire, à des distances infinies les uns des autres, est constante ¹.

La conformité du principe de la conservation de l'énergie avec les faits de l'expérience est suffisamment apparente toutes les fois qu'il s'agit de changement visibles ou perceptibles de quelque manière dans la position ou dans la configuration d'un corps ou d'un système de corps, tels que l'action de la pesanteur, la tension d'un corps élastique, etc. Dans ces cas nous voyons facilement que de l'énergie est alternativement emmagasinée comme énergie de position et restituée comme énergie de mouvement. Mais il y a une classe de cas dans lesquels il y a perte d'énergie de mouvement sans changement manifeste de position. Quand deux corps également inélas-

1. Il est à observer que je formule ici la doctrine de la conservation de l'énergie dans son application à l'univers, telle qu'elle est généralement soutenue parmi les physiciens. La discussion de la question de savoir si nous avons le droit d'appliquer à l'Infini les concepts logiques et les formules mathématiques basées sur les conditions de l'existence finie, de traiter le monde illimité comme un système mécanique défini, et son énergie comme une quantité constante, sera réservée pour un moment ultérieur du progrès de nos recherches.

tiques, se mouvant avec des vitesses égales dans des directions opposées, se choquent centralement, il y a, au moins en apparence, une destruction totale de mouvement, et il n'y a pas gain de position, car les corps demeurent en repos au point où s'est fait le choc. Une semblable perte d'énergie actuelle est observée toutes les fois que le travail se fait en opposition au frottement. Que devient l'énergie de mouvement qui semble disparaître dans des cas de cette espèce? A cette question Newton n'avait évidemment pas de réponse précise. Il affirmait expressément que « le mouvement peut être gagné ou perdu », que « *La vis inertiae* étant un principe passif..., quelque autre principe était nécessaire pour mettre les corps en mouvement, et qu'une fois qu'ils sont en mouvement, quelque autre principe est nécessaire pour conserver le mouvement... En raison de l'incompressibilité des fluides, et de l'indépendance de leurs parties, et du peu d'élasticité des solides, le mouvement est beaucoup plus apte à être perdu que gagné et est toujours en décroissance ¹. » Mais, c'est une erreur de soutenir avec Stewart et Tait ², que la réponse était inconnue au temps de Newton. La réponse de la science moderne qui est que la perte apparente du mouvement des masses résulte de sa conversion réelle en mouvement moléculaire, avait été devancée par Leibnitz, comme le montre le remarquable passage qui suit, trouvé dans sa cinquième lettre à Clarke : « J'avais soutenu que les *Forces actives* se conservent dans le monde. On m'objecte que deux corps mous, ou non élastiques, concourant entre eux, perdent de leur *force*. Je réponds que non. Il est vrai que les *Touts* la perdent par rapport à leur mouvement total ; mais les *parties* la reçoivent étant agitées intérieurement par la force du concours. Ainsi ce défaut n'arrive qu'en apparence. Les forces ne sont pas détruites, mais dissipées par les parties menues. Ce n'est pas les perdre, mais c'est faire comme font ceux qui changent la grosse monnaie en petite ³ ». La vérité ainsi énoncée était une « vérité alitée » pour longtemps (pour employer une ex-

1. « *Opticks* », 4^e éd., p. 373.

2. *The Unseen Universe*, § 100.

3. *Opp. phil.*, éd. Erdmann, p. 775. Il est étrange que ce passage soit resté inaperçu pendant de longues années même après l'adoption de la théorie moderne de la conservation et de la transformation de l'énergie et de la corrélation

pression de Coleridge); en dépit des discussions vigoureuses et même violentes sur les forces et leur mesure, et au milieu de la rapide accumulation des faits et des théories physiques, elle resta stérile pendant plus d'un siècle. Cette anomalie apparente s'explique par cette circonstance que, jusqu'au milieu du siècle présent, la chaleur, l'électricité, le magnétisme, etc., étaient supposés être des substances matérielles, dont la convertibilité en mouvement ou énergie mécanique paraissait tout à fait inconcevable. Ce ne fut qu'après l'établissement des théories dynamiques des « impondérables » que la doctrine de la conservation et de la transformation de l'énergie devint féconde, et conduisit à une reconstitution fondamentale de toute la physique ¹.

La corrélation et la conversion mutuelle des diverses formes de l'énergie ont été éclaircies avec tant de détails dans les écrits scientifiques du jour, qu'il n'est pas nécessaire d'y insister ici. Le but de mon coup d'œil rapide sur l'histoire de la doctrine de la conservation de l'énergie, ou plutôt de l'évolution des concepts scientifiques qu'elle embrasse, était simplement de montrer que cette histoire est en réalité celle d'un abandon progressif de la proposition mécanique placée en tête du présent chapitre, et qui est identique en substance avec la théorie cartésienne de la conservation du mouvement — circonstance dont j'espère indiquer plus loin la signification.

Nous avons maintenant discuté les quatre propositions fondamentales de la théorie atomo-mécanique, et nous avons trouvé (sans entrer dans le domaine des sciences organiques) qu'elles sont toutes récusées par la chimie, la physique, l'as-

des forces. Il y a bien des années que je l'ai trouvé; Du Bois-Reymond y a récemment appelé l'attention dans une leçon: « Leibnizische Gedanken in der neuern Naturwissenschaft ». Il y a un autre passage du même sens dans les œuvres mathématiques de Leibnitz (éd. Gerhardt), vol. II, p. 230. Le Dr Berthold a montré (Pogg. Ann., vol. CLVII, p. 350) que l'« allotropie de la force » fut énoncée, il y a plus d'un siècle, dans des termes d'une précision curieuse, par Diderot, dans ses « Pensées sur l'interprétation de la nature », Londres, 1754, § 43.

¹ Je connais d'ailleurs les anticipations de Bacon, Locke, Rumford, Sir Humphry Davy, etc., sur la théorie moderne de la chaleur; mais leur déclaration, si claire qu'elle soit, que la chaleur n'est qu'un « mode de mouvement », a été aussi peu remarquée des physiiciens contemporains que la doctrine leibnitzienne citée plus haut.

tronomie. Avant de commencer à rechercher les causes et les conséquences de ce fait et de considérer la relation de la théorie mécanique avec les lois de la pensée et l'histoire de son évolution, il est important d'ajouter à cette discussion une recherche sur la nature, la validité et la valeur scientifique de l'hypothèse de la constitution atomique de la matière.

CHAPITRE VII

LA THÉORIE DE LA CONSTITUTION ATOMIQUE DE LA MATIÈRE

Cette doctrine, qu'une réduction complète de la matière à ses éléments réels, si elle pouvait être pratiquement effectuée, aboutirait à un agrégat de particules indivisibles et indestructibles, est un des plus anciens produits de la spéculation humaine, et elle a tenu bon avec plus de persistance qu'aucune autre opinion de la science ou de la philosophie. Il est vrai que la théorie atomique, depuis sa première promulgation par les anciens philosophes grecs et son expression élaborée par Lucrèce, a été modifiée et perfectionnée. Il n'y a probablement personne aujourd'hui qui gratifie les atomes de crochets et de trous ou qui rende compte du goût amer de l'absinthe par la rudesse ni de la douceur du miel et du lait par la rondeur polie des atomes qui les constituent¹. Mais les atomes de la science moderne sont encore d'un poids déterminé, sinon d'une forme définie, unique et constante; ils sont quelque chose de plus que des unités abstraites, même aux yeux de ceux qui, comme Boscovich, Faraday, Ampère ou Fechner, les considèrent comme de purs centres de force. Et il n'y a aucune difficulté à exprimer la théorie atomique dans des termes également applicables à toutes les acceptions dans lesquelles elle est prise aujourd'hui par les hommes de science. Quelque diversité d'opinion qui existe quant à la forme, la grandeur, etc. des atomes, tous ceux qui avancent l'hypothèse atomique dans

1. Lucretius, *De Rerum Natura*, II, 398 seq.

une quelconque de ses variétés, comme théorie physique, sont d'accord sur trois propositions :

1. *Les atomes sont absolument simples, inallérables, indestructibles; ils sont physiquement, sinon mathématiquement, indivisibles.*

2. *La matière est composée de parties discrètes, les atomes constituants étant séparés par des espaces intersticiels vides. A la continuité de l'espace s'oppose la discontinuité de la matière. L'expansion d'un corps est simplement un accroissement, sa contraction une diminution des espaces qui séparent les atomes.*

3. *Les atomes composant les divers éléments chimiques ont des poids spécifiques déterminés correspondant à leurs équivalents de combinaison¹.*

De son propre aveu, la théorie atomique n'est qu'une hypothèse. Cela n'est pas, en soi, décisif contre sa valeur ; toutes les théories physiques dignes de ce nom sont des hypothèses qui peuvent être reconnues comme vraies si elles sont conséquentes avec elles-mêmes, si elles sont conformes aux règles de la logique, si elles s'accordent avec les faits qu'elles servent à unir ou à expliquer, si elles sont conformes à l'ordre reconnu de la nature, si elles se prouvent suffisamment elles-mêmes par des anticipations ou des prévisions dignes de foi, de faits que l'observation ou l'expérimentation subséquentes vérifient; enfin, si elles sont simples et ont une valeur réductive. Les mérites de la théorie atomique doivent aussi être déterminés en voyant si elle rend compte d'une façon satisfaisante et simple des phénomènes pour l'explication desquels elle est proposée, et si elle est d'accord avec elle-même et avec les lois connues de la raison et de la nature.

De quels faits l'hypothèse atomique est-elle donc destinée à rendre compte, et jusqu'à quel point le compte qu'elle en rend est-il satisfaisant ?

On prétend que la première des trois propositions ci-dessus énumérées (la proposition qui affirme l'intégrité persistante

1. Pour éviter d'être confus, je néglige volontairement, pour le moment, la distinction entre les *molécules*, produits ultimes de la division physique de la matière, et les *atomes*, produits ultimes de sa décomposition chimique; je préfère employer le mot *atomes* pour désigner les plus petites particules en lesquelles les corps sont divisibles par n'importe quel moyen.

des atomes ou leur inaltérabilité en poids et en volume) rend compte de l'indestructibilité et de l'impénétrabilité de la matière; que la seconde de ces propositions (relative à la discontinuité de la matière) est un postulat indispensable pour l'explication de certains phénomènes physiques, tels que la dispersion et la polarisation de la lumière; et que la troisième proposition (d'après laquelle les atomes composant les corps simples ont des poids spécifiques déterminés) est l'expression générale, nécessaire des lois de la constitution définie, des proportions équivalentes et des combinaisons multiples en chimie.

En discutant ces points, il est important d'abord de vérifier les faits et de ramener les formules de ces faits à leur expression exacte, puis de voir jusqu'à quel point ils sont réduits par la théorie.

1. L'indestructibilité de la matière est une vérité indubitable. Mais en quel sens et avec quel fondement cette indestructibilité est-elle attribuée à la matière? La réponse unanime des atomistes est celle-ci : l'expérience nous apprend que tous les changements auxquels la matière est soumise ne sont que des changements de forme, et que sous ces changements il y a une constante invariable — la masse ou quantité de matière. La constance de la masse est attestée par la balance, qui montre que ni la fusion, ni la sublimation, ni la génération, ni la corruption ne peuvent rien ajouter ni retrancher au poids d'un corps soumis à l'expérience. Quand une livre de charbon est brûlée, la balance démontre que cette livre continue d'exister dans l'acide carbonique produit par la combustion, et qu'on peut en retirer le poids original de charbon. La quantité de matière est mesurée par son poids, et ce poids est invariable.

Tel est le fait, connu de tout le monde, et son interprétation est également connue. Pour vérifier l'exactitude de cette interprétation, qu'on nous permette de changer légèrement la méthode employée. Au lieu de brûler la livre de charbon, portons-la simplement au sommet d'une montagne ou sous une latitude moindre; son poids est-il encore le même? Relativement, oui; il fait encore équilibre au contre-poids primitif. Mais le poids absolu n'est plus le même. C'est ce qui se manifeste si nous donnons à la balance une autre forme, prenant un pendule au lieu d'une paire de plateaux. Le pendule, sur la

montagne ou près de l'équateur, oscille plus lentement qu'au pied de la montagne ou près du pôle, par la raison qu'il est devenu plus léger, étant plus éloigné du centre d'attraction de la terre, conformément à cette loi que les attractions des corps varient en raison inverse des carrés des distances.

Il est évident par là que la constance, sur l'observation de laquelle l'assertion de l'indestructibilité de la matière est basée, est simplement la constance d'une relation, et que l'expression ordinaire du fait est grossière et inadéquate. En réalité, tandis qu'il est vrai que le poids d'un corps est la mesure de sa masse, ce n'est là qu'un simple cas de ce fait plus général que les masses des corps sont inversement proportionnelles aux vitesses qui leur sont données par l'action de forces égales, ou, plus généralement encore, inversement proportionnelles aux accélérations produites en eux par les forces égales. Dans le cas de la pesanteur, les forces d'attraction sont directement proportionnelles aux masses, de sorte que l'action de ces forces (poids) est la plus simple mesure de la relation qui existe entre deux masses quelconques, comme telles; mais dans toute recherche sur la validité de la théorie atomique, il est nécessaire de se souvenir que ce poids n'est pas l'équivalent, ou plutôt la représentation d'une entité substantielle absolue dans l'un des corps (le corps pesé), mais seulement l'expression d'une relation entre deux corps qui s'attirent mutuellement; et, de plus, il est nécessaire de se souvenir que ce poids peut être indéfiniment réduit, sans aucune diminution dans la masse du corps pesé, par un simple changement de position par rapport au corps avec lequel il est en relation.

Les masses trouvent leur vraie et unique mesure dans l'action des forces, et la persistance de l'effet de cette action est l'expression simple et exacte du fait ordinairement appelé indestructibilité de la matière. Il est clair que la théorie atomique n'explique en aucun sens, ne rend aucun compte de cette persistance. Il se peut qu'elle soit un attribut des particules minuscules, insensibles que l'on suppose constituer la matière, aussi bien que des masses sensibles; mais, sûrement, la présence hypothétique d'un fait dans l'atome n'est pas l'explication de la présence actuelle du même fait dans la masse conglomérée. Quel que soit le mystère que renferme le phénomène, il est aussi grand dans le cas de l'atome que dans celui

d'une sphère solaire ou planétaire. Briser un aimant en morceaux, et montrer que chaque fragment est doué de la polarité magnétique de l'aimant entier, ce n'est pas expliquer le phénomène du magnétisme. Un phénomène n'est pas expliqué pour être rapetissé. Un fait n'est pas transformé en une théorie parce qu'on le regarde par le gros bout d'une lorgnette. L'hypothèse des atomes ultimes indestructibles n'est pas nécessairement impliquée dans la persistance du poids, et peut, tout au plus, rendre compte de l'indestructibilité de la matière, si l'on peut montrer qu'il y a une limite absolue à la compressibilité de la matière — en d'autres termes, qu'il y a un volume minimum absolu pour chaque masse déterminée. Ceci nous conduit à considérer cette propriété générale de la matière qui, probablement, dans l'esprit de la plupart des hommes, est celle qui exige le plus impérieusement l'hypothèse des atomes, son impénétrabilité.

« Deux corps ne peuvent pas occuper le même espace » — telle est l'expression ordinaire du fait en question. Comme l'indestructibilité de la matière, on prétend qu'il est une donnée de l'expérience. « Que tous les corps sont impénétrables », dit Sir Isaac Newton, « nous le savons, non par la raison, mais par les sens¹ ». Voyons en quel sens et dans quelle mesure cette prétention est légitime.

La proposition, d'après laquelle un espace occupé par un corps ne peut pas être occupé par un autre, implique l'hypothèse que l'espace est une entité objective, absolue, se mesurant par elle-même, et cette autre hypothèse qu'il y a un espace minimum qu'un corps donné remplit absolument, de façon à en exclure tout autre corps. Une vérification expérimentale de cette proposition doit donc prouver qu'il y a une limite absolue à la compressibilité de toute matière. L'expérience nous autorise-t-elle à affirmer une telle limite ? Assurément non. Il est vrai que dans le cas des solides et des liquides, il y a des limites pratiques au-delà desquelles la compression par les moyens mécaniques dont nous disposons est impossible ; mais là même nous rencontrons ce fait que les volumes des fluides, qui résistent effectivement à tous les

1. « Corpora omnia impenetrabilia esse, non ratione, sed sensu colligimus. » — Phil. Nat. *Princ. Math.* lib. III, reg. 3.

efforts pour réduire leur volume par pression extérieure, sont facilement réduits par simple mélange. Ainsi l'acide sulfurique et l'eau, à la température ordinaire, ne cèdent pas sensiblement à la pression ; mais quand ils sont mêlés, le volume résultant est matériellement moindre que la somme des volumes des liquides mêlés. Mais, sans insister sur ce point ni sur les phénomènes qui se manifestent dans le cours d'une dissolution ou d'une réaction chimique, il faut dire que l'expérience ne témoigne nullement de l'impénétrabilité de la matière dans tous les modes de son agrégation.

Quand les gaz sont soumis à la pression, le résultat est simplement un accroissement de la force d'expansion proportionnel à la pression exercée, d'après la loi de Boyle ou de Mariotte (dont les modifications et les exceptions apparentes, montrées par les résultats des expériences de Regnault et autres, n'ont pas besoin d'être exprimées ici, parce qu'elles n'importent pas à l'argument). Une limite expérimentale définie n'est atteinte que dans le cas des gaz pour lesquels la pression produit liquéfaction ou solidification. Cependant le phénomène le plus significatif que l'expérience fournisse à ce sujet est la diffusion des gaz. Toutes les fois que deux ou plusieurs gaz — n'agissant pas chimiquement l'un sur l'autre — sont introduits dans un espace donné, chaque gaz se répand dans cet espace comme s'il y était seul ; ou bien, comme Dalton, qui passe pour le père de la théorie atomique moderne, l'exprime : « Les gaz sont mutuellement passifs, et passent les uns à travers les autres comme à travers le vide. »

Quelle que soit la réalité qui correspond à la notion de l'impénétrabilité de la matière, cette impénétrabilité n'est pas, au sens des atomistes, une donnée de l'expérience.

En somme, il semblerait que la validité de la première proposition de la théorie atomique n'est pas confirmée par les faits. Même si l'inaltérabilité prétendue des particules constituantes supposées ultimes de la matière, se présentait, en montrant ses titres, comme quelque chose de plus qu'une simple reproduction, sous la forme d'une hypothèse, d'un fait observé, même si elle pouvait mériter le nom d'une généralisation ou d'une théorie, la critique aurait encore à lui reprocher d'être une généralisation de faits grossièrement observés et imparfaitement saisis.

A ce propos on peut remarquer que la théorie atomique est devenue presque sans valeur en tant qu'explication de l'im-pénétrabilité de la matière, depuis qu'elle a été employée au service des théories ondulatoires du rayonnement, et qu'elle a pris la forme sous laquelle elle est maintenant soutenue par la majorité des physiciens, comme nous allons le voir. D'après cette forme de la théorie, ou les atomes sont de simples points, complètement dépourvus d'étendue, ou leurs dimensions sont infiniment petites comparées aux distances qui les séparent, quel que soit l'état d'agrégation des substances dans lesquelles ils entrent. A ce point de vue, la résistance qu'un corps, c'est-à-dire un système d'atomes, offre à l'intrusion d'un autre corps est due, non à la rigidité ou à l'inaltérabilité du volume des atomes individuels, mais à la relation entre les forces attractives et répulsives dont ils sont supposés doués. Il y a des physiciens soutenant cette doctrine qui sont d'avis que la constitution atomique de la matière n'en exclut pas la pénétrabilité; entr'autres M. Cauchy, qui, après avoir défini les atomes « des points matériels sans étendue », tient ce langage : « Ainsi, cette propriété de la matière que nous nommons impénétrabilité se trouve expliquée, quand on considère les atomes comme des points matériels qui exercent les uns sur les autres des attractions ou des répulsions variables avec les distances qui les séparent... Il résulte encore de ce qui précède, que, s'il plaisait à l'Auteur de la nature, de modifier seulement les lois suivant lesquelles les atomes s'attirent ou se repoussent, nous pourrions voir, à l'instant même, les corps les plus durs se pénétrer les uns les autres, les plus petites parcelles de matière occuper des espaces démesurés, ou les masses les plus considérables se réduire aux plus petits volumes, et l'univers entier se concentrer pour ainsi dire en un seul point ¹. »

2. La seconde proposition fondamentale de la théorie atomique déclare la matière essentiellement discontinue. Les partisans de la théorie affirment qu'il y a une série de phénomènes physiques qui sont inexplicables si l'on ne suppose que les particules constituantes de la matière sont séparées par des interstices vides. Les plus remarquables de ces phéno-

1. *Sept leçons de physique générale*, éd. Moigno, p. 38 seq.

mènes sont la division et la polarisation de la lumière. Les raisons, pour lesquelles l'hypothèse de la structure moléculaire discrète de la matière, est jugée indispensable pour l'explication de ces phénomènes, peuvent être formulées en quelques mots.

D'après la théorie des ondulations, la division de la lumière, ou sa séparation entre les couleurs du spectre, par la réfraction est une conséquence de l'inégalité du retard éprouvé par les différentes ondulations qui produisent les différentes couleurs, dans leur transmission à travers le milieu réfringent. Cette inégalité de retard présuppose que les vitesses avec lesquelles les divers rayons colorés se transmettent à travers un milieu quelconque, sont différentes, et que ces vitesses dépendent des durées des ondulations. Mais, d'après un théorème de mécanique bien établi, les vitesses, avec lesquelles les ondulations sont propagées à travers un milieu continu, dépendent uniquement de l'élasticité du milieu, comparée à son inertie, et sont complètement indépendantes de la durée et de la forme des vibrations. L'exactitude de ce théorème est attestée par l'expérience dans le cas du son. Les sons de différente hauteur se transmettent avec la même vitesse. S'il en était autrement, la musique entendue à distance serait évidemment un chaos, les différences de vitesse dans la propagation du son détruiraient le rythme, et, dans beaucoup de cas, renverseraient l'ordre de succession. Or, les différences de couleur sont analogues aux différences de hauteur du son, les unes et les autres se réduisant à des différences de durée de vibration. Les durées de vibration augmentent quand on descend l'échelle des sons d'un ton plus élevé à un ton plus bas, et de même la durée d'une onde lumineuse augmente à mesure que nous descendons l'échelle spectrale du violet au rouge. Il suit de là que les rayons de couleurs différentes, comme les sons de différentes hauteurs, seraient propagés avec des vitesses égales, et également réfractés; que, par suite, aucune division de la lumière ne se ferait.

Cette impossibilité théorique de la division de la lumière a toujours été reconnue comme l'une des plus terribles difficultés de la théorie des vibrations. Pour y obvier, Cauchy, à la suggestion de son ami Coriolis, entra dans une série de recherches analytiques dans lesquelles il réussit à montrer que

les vitesses avec lesquelles les divers rayons colorés se propageaient peuvent varier conformément aux durées, si l'on suppose que le milieu de propagation, l'éther, au lieu d'être continu, consiste, en petites particules séparées par des distances sensibles.

Au moyen d'une semblable hypothèse, Fresnel a cherché à écarter les difficultés présentées par les phénomènes de polarisation. Dans la lumière ordinaire, les différentes ondes sont supposées se produire dans diverses directions, toutes transversales à la ligne de propagation; dans la lumière polarisée, les vibrations, toujours transversales au rayon, sont de plus parallèles entre elles, de façon à se produire toutes dans le même plan. Peu de temps après que cette hypothèse fut devenue une théorie élaborée de la polarisation, Poisson observa que, à une distance considérable quelconque de la source lumineuse, toutes les vibrations transversales, dans un milieu élastique continu, doivent devenir longitudinales. Comme, dans le cas de la division, cette objection trouva sa réponse dans l'hypothèse de l'existence « d'intervalles définis » entre les particules de l'éther.

Telles sont, brièvement formulées, les considérations que la physique théorique est censée apporter à l'appui de la théorie atomique. Quant à la valeur de l'argument fondé sur ces considérations, il faut dire d'abord que l'arrangement moléculaire discontinu de la matière ne prouve en aucune façon l'alternance d'atomes inaltérables et indivisibles avec des vides spatiaux absolus. Il est même à craindre que l'argument ne soit erroné non seulement dans ses conclusions, mais aussi, dans son principe. On peut douter que l'hypothèse d'« intervalles finis », entre les particules de l'éther luminifère, soit capable de débarrasser la théorie des ondes lumineuses de ses difficultés. Ce sujet, sous un de ses aspects, a été complètement discuté par E. B. Hunt, dans un article sur la décomposition de la lumière ¹, et les idées qu'il y suggère me paraissent dignes d'une sérieuse attention. Les voici brièvement :

M. Cauchy introduit le phénomène de la décomposition dans le domaine de la théorie des ondes, en déduisant les différences de vitesse des divers rayons lumineux des différences

1. *Sillimann's Journal*, 2^e série, vol. VII, p. 364 seq.

de durée des vibrations correspondantes, au moyen de l'hypothèse d'intervalles déterminés entre les particules du milieu luminifère. Il prend donc, comme établi, que ces rayons lumineux se propagent avec des vitesses différentes. Mais est-ce la vérité ? L'astronomie fournit les moyens de répondre à la question.

On éprouve la sensation de la lumière blanche quand tous les rayons lumineux dont elle est composée frappent l'œil simultanément. La lumière qui vient d'un corps lumineux paraîtra incolore, même si les rayons lumineux qui la composent se meuvent avec des vitesses inégales, pourvu que tous les rayons colorés qui ensemble font la lumière blanche, concourent à un moment donné dans leur action sur la rétine ; dans les cas ordinaires on ne peut apprécier si ces rayons ont quitté le corps lumineux successivement ou ensemble. Mais il en est autrement quand un corps lumineux devient soudainement visible, comme dans le cas des satellites de Jupiter ou de Saturne, après leurs éclipses. A certaines époques, plus de quarante-neuf minutes sont nécessaires pour la transmission de la lumière de Jupiter à la Terre. Or, au moment où un des satellites de Jupiter, qui a été éclipsé par cette planète, émerge de l'ombre, les rayons rouges, si leur vitesse était la plus grande, atteindraient évidemment l'œil les premiers, les orangés les seconds, et ainsi de suite d'après l'échelle chromatique, jusqu'à ce qu'enfin le complément des couleurs fût achevé par l'arrivée du rayon violet, dont la vitesse est supposée être la moindre. Immédiatement après son émergence, le satellite apparaîtrait rouge, et passerait graduellement au blanc à mesure que les autres rayons arriveraient. En sens inverse, au début de l'éclipse, les rayons violets continueraient à arriver après les rayons rouges et les autres rayons intermédiaires, et, jusqu'au moment de sa disparition totale, le satellite s'obscurcirait graduellement jusqu'au violet.

Malheureusement pour l'hypothèse de Cauchy, les observations les plus attentives des éclipses en question n'ont révélé aucune variation semblable de couleur, ni avant l'immersion, ni après l'émergence, le passage de la lumière à l'obscurité se faisant instantanément et sans gradations chromatiques.

L'astronomie offre plusieurs autres phénomènes également en opposition avec la doctrine des vitesses inégales dans

les mouvements des ondes lumineuses. Les étoiles fixes qui sont au-delà de la limite parallaxique et dont la lumière doit cheminer plus de trois ans avant de nous atteindre, sont sujettes à de grandes variations périodiques d'éclat ; et cependant ces variations ne sont pas accompagnées de variations de couleur. De plus l'hypothèse des vitesses différentes pour les différents rayons chromatiques est déconcertée par la théorie de l'aberration. L'aberration est due à ce fait que, dans tous les cas où l'orbite de la planète sur laquelle l'observateur est placé, forme un angle avec la direction du rayon lumineux, il se produit une composition du mouvement de la lumière et du mouvement de la planète, de sorte que la direction dans laquelle la lumière arrive à l'œil est une résultante des deux directions composantes, celle du rayon et celle du mouvement de l'observateur. Si les différents rayons colorés se mouvaient avec des vitesses différentes, il y aurait évidemment plusieurs résultantes, et chaque étoile apparaîtrait comme un spectre coloré, parallèle dans la longueur, à la direction du mouvement de la terre.

Cette allégation, que la vitesse des mouvements ondulatoires qui correspondent aux différentes couleurs ou les produisent, dépend de la longueur des ondes est ainsi en désaccord avec le fait observé. L'hypothèse d'« intervalles finis » comme supplément de la théorie ondulatoire, est sans succès ; il faudra avoir recours à d'autres méthodes pour dégager cette théorie de ses difficultés¹.

1. Depuis la publication du « *Mémoire sur la dispersion de la lumière* » de Cauchy (Prague, 1836), ce fait que le pouvoir de dispersion des différentes substances dépend de leur état d'agrégation et de composition chimique a été le sujet d'une recherche expérimentale étendue ; et les plus éminents physiciens (Briot, Holtzmann, Redtenbacher, C. Neumann, Ketteler) cherchent maintenant l'explication du phénomène de la dispersion dans l'action de la matière pondérable, ou dans l'interaction entre elle et l'éther. Cf. Briot, « *Essai sur la théorie mathématique de la lumière* » (Paris, Mallet-Bachelier, 1864), p. 89, seq. ; Redtenbacher, « *Dynamiden-system* », p. 130 seq. ; Ketteler, « *Ueber den Einfluss der ponderablen Moleküle auf die Dispersion des Lichts, etc.* » (Pogg. Ann., vol. CXL, pp. 2 seq. et 177 seq. Une théorie électro-magnétique de la lumière, suggérée par l'égalité approximative des vitesses avec lesquelles la lumière et les perturbations électro-magnétiques paraissent se propager à travers l'air et d'autres milieux et par l'action d'un aimant (observée par Faraday), quand on fait tourner le plan de polarisation autour de la direction d'un rayon lumineux comme axe, fut émise par Clerk Maxwell en 1865, et a été récemment assez longuement exposée dans son « *Traité sur l'électricité et le ma-*

Les preuves négatives fournies ici contre la supposition d'une constitution atomique ou moléculaire du milieu lumineux, est renforcée par les preuves positives tirées d'une branche de la théorie atomique elle-même — la science moderne de la thermo-dynamique. Maxwell a remarqué, avec une vérité évidente, qu'un tel milieu (dont les atomes ou molécules sont supposés pénétrer les espaces intermoléculaires des substances ordinaires) ne serait ni plus ni moins qu'un gaz, d'une ténuité extrême sans doute, et que chaque vide prétendu serait en fait rempli de ce gaz subtil à la température observée, et à la pression énorme que l'éther, grâce aux fonctions que lui assignent les théories ondulatoires, doit être supposé exercer. Un tel gaz devrait donc avoir une chaleur spécifique non moins énorme, égale à celle de tout autre gaz à la même température et à la même pression, de sorte que la chaleur spécifique de chaque vide serait incomparablement plus grande que celle du même espace rempli d'un autre gaz connu. Cette conséquence remarquable n'est point sans garantie expérimentale, — mais en tant qu'elle s'appliquerait à tous les vides, y compris les espaces intermoléculaires des corps ordinaires à un degré quelconque de cohésion — elle aggrave singulièrement une difficulté de la théorie moléculaire, difficulté qui, par elle-même, est déjà formidable au plus haut point. Dans le chapitre III¹ j'ai remarqué ce fait que, quand un corps est chauffé, une partie seulement de l'énergie qu'il reçoit se manifeste sous la forme de température, c'est-à-dire (d'après les théories modernes) sous la forme de mouvements progressifs des molécules, l'autre partie étant employée à produire des mouvements vibratoires ou rotatoires de leurs éléments constitutifs. D'après la théorie cinétique des gaz, cette dernière partie, ce qu'on appelle l'énergie interne, augmente avec le nombre de variables ou les degrés de liberté dans chaque molécule, et avec elle par conséquent, la chaleur spécifique, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie totale et l'énergie de translation qui produit l'expansion ou la pression, et ainsi elle se manifeste comme température. Si les molécules étaient des « points matériels » sans mobilité interne, ou des

gnétisme, vol. II, pp. 383 seq. Cette théorie est maintenant développée par Helmholtz, Lorentz, Fitzgerald, J.-J. Thomson et lord Rayleigh.

1. Voyez plus haut, p. 18.

sphères parfaitement élastiques et parfaitement polies, l'énergie totale pourrait être employée à produire du mouvement de translation, et aucune partie ne serait convertie en énergie interne. Mais si les molécules, quoique parfaitement élastiques, ne sont pas des sphères parfaites — et elles ne le peuvent pas, toutes les fois qu'elles sont composées de plusieurs atomes chacune, la chaleur spécifique doit au moins être égale à un certain minimum fixé par la théorie. Or les chaleurs spécifiques de l'oxygène, de l'azote et de l'hydrogène (tous diatomiques, leurs molécules étant composées de deux atomes chacune) sont inférieures à ce minimum, comme le montre expérimentalement la comparaison de leurs chaleurs spécifiques à une pression et à un volume constants. Ce minimum théorique serait fort accru en réalité par l'addition de la chaleur spécifique due à l'éther intermoléculaire, si ce dernier était aussi de constitution atomique ou moléculaire. Le désaccord entre les postulats théoriques et les données expérimentales serait immensément élargi.

3 La troisième proposition de l'hypothèse atomique assigne aux atomes que l'on dit composer les différents corps simples des poids déterminés correspondant à leurs équivalents de combinaison, et est censée nécessaire pour rendre compte des faits dont l'énumération et la discussion constituent la chimie. — La vérification convenable de ces faits est d'une grande difficulté, parce qu'ils ont généralement été observés au point de vue de la théorie atomique, et exprimés dans les termes de cette doctrine. Ainsi la différentiation et l'intégration des corps sont invariablement décrites sous l'aspect de combinaison et décomposition; les équivalents de combinaison sont exprimés à titre de poids atomiques ou de volumes, et la plus grande partie de la nomenclature chimique est une reproduction systématique des hypothèses de l'atomisme. Presque tous les faits à vérifier ont besoin d'être préalablement extraits de l'enveloppe que leur donne cette théorie.

Les phénomènes ordinairement décrits sous le nom de combinaison et décomposition chimiques se présentent ainsi à l'observation : Plusieurs corps hétérogènes concourent dans des proportions définies de poids et de volumes; ils agissent les uns sur les autres; ils disparaissent et donnent naissance à un nouveau corps possédant des propriétés qui ne sont ni la

somme ni la moyenne des propriétés des corps qui se sont rencontrés et ont agi l'un sur l'autre (excepté le poids qui est la somme des poids des corps agissants); et cette conversion de plusieurs corps en un seul est accompagnée, dans la plupart des cas, de changements de volume, et dans tous les cas, de dégagement ou d'absorption de chaleur, ou d'autres formes de l'énergie. Inversement, un seul corps homogène donne naissance à des corps hétérogènes, sans qu'il y ait entre les corps produits et le corps original d'autre relation d'identité que celle du poids.

Pour plus de commodité, on peut diviser ces phénomènes en trois classes; la première embrasse la persistance du poids et la combinaison en proportions définies; la seconde le changement de volume et le dégagement ou absorption d'énergie; et la troisième l'apparition d'un ensemble de propriétés chimiques complètement nouvelles.

Evidemment, l'hypothèse atomique n'explique en aucune façon les phénomènes de la seconde classe. Elle est assurément et se reconnaît incompétente pour rendre compte des changements de volume, de température, ou d'énergie latente. Elle paraît incompatible avec les phénomènes de la troisième classe; car, aux yeux de la doctrine atomique, les compositions et décompositions chimiques ne représentent rien de plus que des agrégations et désagrégations de masses dont l'intégrité demeure inaltérable: or le changement radical des propriétés chimiques — qui est le résultat de toute véritable action chimique, et sert à la distinguer du mélange et de la séparation purement mécaniques — manifeste une complète destruction de cette intégrité. Il est possible que cette incompatibilité apparente puisse être écartée à l'aide d'hypothèses auxiliaires; mais cela conduit à abandonner la simplicité de l'hypothèse atomique elle-même, et l'on réduit par là même ses prétentions à être une théorie.

L'hypothèse d'atomes de poids définis et différents peut donc tout au plus être présentée comme une explication des phénomènes de la première classe. Les explique-t-elle en ce sens qu'elle les généralise, qu'elle réduit plusieurs faits à un seul? Nullement; elle en rend compte comme elle prétendait rendre compte de l'indestructibilité et de l'impénétrabilité de la matière, en reproduisant simplement le fait observé sous la forme

d'une hypothèse. C'est une fois de plus (pour employer une expression scolastique) expliquer *idem per idem*. Elle dit : les grandes masses se combinent par proportions définies de poids, parce que les petites masses, les atomes dont elles sont des multiples, sont par proportions définies de poids. Elle pulvérise le fait et prétend par là l'avoir élevé à la hauteur d'une théorie ¹.

La vérité est que, comme Sir William Thomson l'a observé, « l'hypothèse des atomes ne peut expliquer aucune propriété d'un corps sans l'attribuer préalablement aux atomes eux-mêmes ».

Les considérations précédentes n'ôtent rien, d'ailleurs, à la valeur de l'hypothèse atomique comme procédé graphique ou d'exposition, comme venant en aide à la faculté représentative en « réalisant » les phases de la transformation chimique ou physique. C'est un fait indiscutable que la chimie lui doit une grande part de ses progrès pratiques, et que les formules structurales fondées sur elles ont permis aux chimistes, non seulement de rechercher la connexion et la dépendance mutuelle des divers moments dans la métamorphose de ce qu'on appelle « corps simples » et « corps composés », mais, dans beaucoup de cas (tels que celui de la série hydro-carbonique dans la chimie organique), de prévoir avec succès les résultats de la recherche expérimentale. La question de savoir jusqu'à quel point la théorie atomique est encore indispensable au chimiste comme « hypothèse de travail » est en ce moment vivement discutée parmi les hommes de la plus haute autorité scientifique, dont beaucoup n'hésitent pas à endosser la déclaration de Cournot (faite il y a quelques années), que « la foi dans les atomes est plutôt un embarras qu'un secours ² ».

1. On a déjà montré plus haut (p. 12), que la supposition d'atomes de poids spécifiques différents est, au point de vue de la théorie atomique elle-même, simplement absurde. D'après la conception mécanique qui est au fond de toute l'hypothèse atomique, les différences de poids sont des différences de densité ; et les différences de densité sont des différences de distance entre les particules contenues dans un espace donné. Mais dans l'atome, il n'y a pas multiplicité de particules ni espace vide ; par suite, les différences de densité ou de poids sont impossibles dans les atomes.

2. • En somme, pour l'harmonie générale du système de nos connaissances, par conséquent (autant que nous pouvons en juger) pour la plus juste perception de l'harmonie qui certainement existe dans l'ensemble des choses, la foi dans les atomes est plutôt un embarras qu'un secours. • Cournot, *Traité de l'en-*

non seulement parce que — au grand regret de Cournot — elle met un abîme infranchissable entre les phénomènes du monde organique et ceux du monde inorganique, mais parce que, même comme représentation des phases et des résultats des processus chimiques les plus ordinaires, elle est à la fois inexacte et trompeuse. Les modifications auxquelles on a dernièrement été obligé de la soumettre, par suite des exigences de l'état présent de la chimie, — modifications dont on trouve un exemple dans la doctrine des enchainements moléculaires ou atomiques, etc., avec les théories subsidiaires du choc moléculaire, proposées par Kékulé et autres — attestent les difficultés qu'on rencontre en essayant de mettre l'hypothèse atomique d'accord avec les exigences théoriques présentes. A mesure que l'attention des chimistes modernes se dirige vers la transmission et la transformation de l'énergie — que l'on constate dans tout exemple de « composition » et « décomposition » chimiques, aussi bien que dans tout changement de forme, — l'insuffisance de cette hypothèse comme esquisse figurative de la nature réelle des processus chimiques devient de plus en plus apparente ¹.

Je vais maintenant discuter l'une des plus remarquables applications de l'hypothèse atomique à la physique — la théorie cinétique des gaz.

châinement des idées fondamentales dans les sciences et dans l'histoire, I, 254 seq.

1. Comme exemple de la défaveur où l'hypothèse atomique est en train de tomber parmi les chimistes distingués, qu'on me permette de citer un passage d'un essai de feu Sir Benjamin C. Brodie, professeur de chimie à Oxford : « Je ne puis m'empêcher de dire qu'à mes yeux la doctrine atomique s'est montrée incapable de rendre compte du système fort compliqué de faits chimiques mis en lumière par les travaux des chimistes modernes. Je ne pense pas que la théorie atomique ait réussi à construire une représentation adéquate bonne ou même utile de ces faits. » *On the Mode of Representation afforded by the Chemical Calculus as contrasted with the Atomic Theory. Chemical news*, août 1867, p. 72. — Après cette citation, je dois cependant ajouter que je ne suis pas d'accord avec le schème théorique de Brodie, du moins comme je le comprends.

CHAPITRE VIII

LA THÉORIE CINÉTIQUE DES GAZ — CONDITIONS DE VALIDITÉ DES HYPOTHÈSES SCIENTIFIQUES

Dans le quatrième chapitre ¹ j'ai déjà donné une esquisse de la doctrine généralement connue et acceptée sous le nom de théorie cinétique des gaz. Le principe de cette théorie, c'est qu'un corps gazeux consiste en un grand nombre de particules solides minuscules — molécules ou atomes — animées d'un mouvement rectiligne perpétuel, qui est conservé dans son ensemble à cause de l'élasticité absolue des particules mobiles, tandis que la direction du mouvement de chaque particule change incessamment par suite de leurs rencontres et de collisions mutuelles. Les particules qui se heurtent sont supposées n'agir l'une sur l'autre qu'à de très petites distances, et pendant des temps très courts avant et après la collision, leur mouvement étant libre et par conséquent rectiligne, pendant ces intervalles d'espace et de temps. De plus, les durées des mouvements rectilignes en chemin libre sont supposées infiniment grandes par rapport aux durées des actions mutuelles.

Cette théorie fut avancée pour la première fois par Kroenig ², et a été depuis élaborée par Clausius, Maxwell, Boltzmann, Stefan, Pfaundler, et d'autres physiciens très célèbres.

Comme je l'ai fait pour l'hypothèse atomique en général,

1. V. plus haut, p. 22.

2. *Pogg. Ann.*, vol. XCIX, p. 315 seq. Comme c'est l'ordinaire en pareil cas, des prévisions de la théorie ont été découvertes depuis dans les écrits de divers physiciens plus anciens — Cf. Du Bois-Reymond dans *Pogg. Ann.*, vol. CVII, p. 490 seq.

je me propose pour le présent de discuter non pas tant la valeur logique de la théorie en question que sa valeur scientifique. Pour cela il sera nécessaire cependant de déterminer d'abord la vraie nature et la vraie fonction d'une hypothèse scientifique — non seulement les critères de sa valeur, mais aussi les conditions de sa validité.

Une hypothèse scientifique peut être définie d'une façon générale une explication ou une tentative d'explication provisoire de phénomènes physiques ¹. Mais qu'est-ce qu'une explication au vrai sens scientifique? Les réponses faites à cette question par les logiciens et les hommes de science, — différentes dans la forme, — concordent pour ce qu'il y a d'essentiel dans le fond. Expliquer des phénomènes c'est montrer leur identité partielle ou totale avec d'autres phénomènes. Toute science est connaissance; et toute connaissance, pour employer les termes de Sir William Hamilton ², est une « unification du multiple ». « La base de toute explication scientifique, dit Bain ³, consiste à assimiler un fait à un ou plusieurs autres faits. Elle est identique avec la généralisation. » Et « la généralisation consiste seulement à saisir l'un dans le multiple ⁴ ». De même Jevons ⁵ : « La science naît de la découverte de l'identité dans la diversité », et ⁶ « tout grand progrès dans la science consiste en une grande généralisation révélant des ressemblances profondes et délicates. » La même chose est exprimée à un autre endroit par l'auteur que je viens de citer ⁷ : « Tout acte d'explication consiste à découvrir et à révéler une ressemblance entre des faits, ou à montrer qu'un plus ou moins grand degré d'identité existe entre des phénomènes en apparence différents. »

Tout cela peut être exprimé ainsi en langage familier : Quand un nouveau phénomène se présente à l'homme de

1. Wundt a récemment cherché (*Logique*, I, 403) à distinguer les hypothèses des « anticipations de fait », et à restreindre le terme « hypothèse » à un sens qui, tout en ayant pour lui l'étymologie, est différent de son usage ordinaire aussi bien que scientifique.

2. *Lectures on Metaphysics* (Boston ed.), p. 47-48.

3. *Logic.*, II (Inductive), ch. XII, § 2.

4. Hamilton, *l. c.*, p. 48.

5. Jevons, *Principles of Science*, I, p. 4.

6. *Ibid.*, II, p. 281.

7. *Ibid.*, II, p. 166.

science ou à l'observateur ordinaire, cette question se pose à l'esprit de l'un comme de l'autre : Qu'est-ce? — et cette question signifie simplement : De quel fait connu, familier, ce fait étrange en apparence, inconnu jusqu'ici, est-il une nouvelle forme, — de quel fait connu, familier est-il un déguisement ou une explication? Ou, en tant que l'identité partielle ou totale de plusieurs phénomènes est la base de la classification (une classe étant un certain nombre d'objets ayant une ou plusieurs propriétés en commun), on peut dire aussi que toute explication, y compris l'explication par hypothèse, est au fond une classification.

Telle étant la nature essentielle de l'explication scientifique, dont l'hypothèse est une forme à titre d'essai, il en résulte qu'aucune hypothèse ne peut être valide, si elle n'identifie tout ou partie du phénomène qu'elle est destinée à expliquer, avec un ou plusieurs autres phénomènes préalablement observés. La première règle, la règle fondamentale de tout raisonnement hypothétique dans la science peut formellement se résoudre en deux propositions : — la première est que toute hypothèse valide doit être une identification de deux termes, le fait à expliquer et un fait par lequel on l'explique ; — et la seconde, que ce dernier fait doit être connu par l'expérience.

D'après la première de ces propositions, toute hypothèse est frivole, quand elle substitue une supposition à un fait. C'est ce qu'on appelle, dans le langage scolastique, expliquer *obscurum per obscurius*, ou bien — la supposition étant l'expression du fait lui-même sous une autre forme, le fait répété — expliquer *idem per idem*. La frivolité de ces hypothèses confine à une puérilité déplorable quand elles remplacent un fait simple par plusieurs suppositions arbitraires, parmi lesquelles est le fait lui-même. Quelques-uns des usages de l'hypothèse atomique en physique et en chimie, discutés dans le chapitre précédent, forment de remarquables exemples de ces suppositions sans profit ; et les exemples analogues abondent parmi les formules mathématiques qui sont assez souvent décorées du nom de théories physiques. En beaucoup de cas, ces formules sont simplement le résultat d'une série de transformations d'une équation qui exprime une hypothèse dont les éléments ne sont ni plus ni moins que les élé-

ments des phénomènes dont il s'agit de rendre compte, le seul mérite de la formule qui en résulte étant de ne pas être en conflit avec la formule initiale ¹.

Pour remplir la première condition de sa validité, une hypothèse doit mettre le fait à expliquer en relation avec un ou plusieurs autres faits, en identifiant une partie ou la totalité du premier avec une partie ou la totalité du second. Dans ce sens on a dit avec raison qu'une hypothèse valide réduit le nombre des éléments non compris d'un phénomène ². Dans le même sens on dit quelquefois que toute théorie ou hypo-

1. J'espère qu'on ne se méprendra pas jusqu'à m'accuser de méconnaître les services que les sciences physiques tirent des mathématiques. Ces services, — surtout ceux qu'a rendus l'analyse moderne — sont incalculables. Mais il y a des mathématiciens qui s'imaginent qu'ils ont résolu tous les mystères enveloppés dans un cas d'action physique, quand ils l'ont réduit à la forme d'une expression différentielle précédée d'un groupe de signes intégraux. Même quand leurs équations sont intégrables, ils devraient se souvenir que les opérations des mathématiques sont essentiellement déductives, et que, si elles peuvent étendre une théorie physique, elles ne peuvent jamais l'approfondir. Je reconnais que les mathématiques sont beaucoup plus que des *καθόρμιστα ψυχῆς*, et que leur office dans la recherche des causes des phénomènes naturels est beaucoup plus important que les fonctions purement régulatrices de la logique formelle dans la science en général; — j'accorde que l'application des mathématiques à la physique a non-seulement mis en lumière la signification de beaucoup de résultats expérimentaux, mais qu'elle a aussi souvent été un guide digne de foi à des recherches fructueuses. Cependant quelques-uns de nos physiciens et mathématiciens éminents pourraient encore lire avec profit le quatre-vingt-seizième aphorisme du premier livre du *Novum organum* de Bacon: « Naturalis philosophia adhuc sincera non invenitur, sed infecta et corrupta: in Aristotelis schola per logicam; in Platonis schola, per theologiam naturalem; in secunda schola Platonis, Probi et aliorum, per mathematicam, quæ philosophiam naturalem terminare, non generare aut procreare debet. » Quant à la valeur de la classe de formules indiquées dans le texte, il n'est peut-être pas hors de propos de citer les paroles de Cournot (*De l'enchaînement*, etc., I, p. 249): « Tant qu'un calcul ne fait que rendre ce que l'on a tiré de l'observation pour l'introduire dans les éléments de calcul, à vrai dire, il n'ajoute rien aux données de l'observation. » Les admirables réflexions de M. Poincaré (*Théorie nouvelle de la rotation des corps*, éd. 1831, p. 79) ont le même objet: « Ce qui a pu faire illusion à quelques esprits sur cette espèce de force qu'ils supposent aux formules de l'analyse, c'est qu'on en retire, avec assez de facilité, des vérités déjà connues, et qu'on y a, pour ainsi dire, soi-même introduites, et il semble alors que l'analyse nous donne ce qu'elle ne fait que nous rendre dans un autre langage. Quand un théorème est connu, on n'a qu'à l'exprimer par des équations; si le théorème est vrai, chacune d'elles ne peut manquer d'être exacte, aussi bien que les transformées qu'on en peut déduire, et si l'on arrive ainsi à quelque formule évidente ou bien établie d'ailleurs, on n'a qu'à prendre cette expression comme point de départ, à revenir sur ses pas, et le calcul seul paraît avoir conduit comme de lui-même au théorème dont il s'agit. Mais c'est en cela que le lecteur est trompé. »

2. Zoellner, *Natur der Kometen*, p. 189, seq.

thèse vraie est en effet une simplification des données de l'expérience — assertion qui doit être entendue, cependant, en tenant compte de la seconde proposition que nous allons discuter, c'est-à-dire en veillant à ce que la théorie ne soit pas un simple *asylum ignorantiae*, de l'espèce de ceux que l'École appelait *principium expressivum* : telle est l'explication des phénomènes de la vie par un *principe vital*, ou de certains processus chimiques par l'*action catalytique*. Les véritables explications scientifiques sont généralement compliquées de forme, non seulement parce que la plupart des phénomènes, après analyse convenable, se trouvent être complexes, mais parce que le fait le plus simple n'est pas l'effet d'une seule cause, mais le produit d'un ensemble indéterminé d'agents divers, le résultat du concours de nombreuses conditions. La théorie newtonienne du mouvement planétaire est beaucoup plus compliquée que celle de Képler, d'après qui chaque planète est conduite dans sa route par un *angelus vector*. L'explication de la précession des équinoxes donnée par la mécanique céleste moderne est bien inférieure en simplicité à la déclaration, que parmi les grandes périodes originellement établies par l'auteur de l'univers, figurait le cycle d'Hipparque. Le vieil adage, *simplex veri judicium*, doit être interprété d'une manière libre ayant de pouvoir être considéré comme une règle sûre dans la détermination de la validité ou de la valeur des doctrines scientifiques.

J'arrive maintenant à la seconde condition de validité des hypothèses : le phénomène explicatif (c. à. d. celui avec lequel est identifié le phénomène à expliquer) doit être une donnée de l'expérience. Cette proposition équivaut en substance à la partie de la première *regula philosophandi* de Newton ¹, dans laquelle il insiste sur ce point que la cause choisie pour l'explication des choses de la nature doit être une *vera causa*, terme qu'il ne définit pas expressément dans les *Principia*, mais dont le sens peut être extrait du passage suivant de son *Optique* ² : « Dire que chaque espèce de choses est douée d'une qualité spécifique occulte par laquelle elle agit et produit des effets manifestes, c'est ne rien dire. Mais ex-

1. *Phil. nat. Princ. math.*, lib. III.

2. 4^e édition, p. 377.

primer deux ou trois principes généraux du mouvement tirés *des phénomènes* et ensuite montrer comment les propriétés et actions de toutes les choses matérielles découlent de ces principes manifestes, ce serait faire un grand pas en philosophie, quand même les causes de ces principes ne seraient pas encore découvertes. »

La condition dont s'agit a été longtemps le sujet d'une discussion très vive entre J. S. Mill, Whewell et autres; mais on reconnaîtra qu'après avoir fait les restrictions convenables pour les différences de tournure d'esprit, il reste peu de désaccord entre les philosophes. La formule récente de G. H. Lewes¹ est: « Une explication, pour être valide, doit être exprimée aux termes de phénomènes déjà observés »; et voici la contre-partie de Jevons²: « L'accord avec le fait à expliquer est l'unique et suffisante caractéristique d'une hypothèse vraie ». Toutes deux sont beaucoup trop larges. Aussi Lewes et Jevons eux-mêmes les modifient au cours de la discussion. Mais la prétention de M. Lewes n'en est pas moins vraie en ce sens qu'aucune explication ne peut être réelle si elle n'est l'identification de données expérimentales. Comme dans tant d'autres cas de controverse scientifique, la confusion qui produit un désaccord apparent entre les parties discutantes, vient de ce que l'on a négligé cette circonstance: que l'identification de deux phénomènes peut être à la fois partielle et indirecte; qu'elle peut être effectuée en montrant que les phénomènes ont quelque trait commun connu, à la condition que l'on suppose dans l'un ou dans les deux phénomènes l'existence de quelque autre trait non encore directement observé et peut-être impossible à observer directement. Le meilleur exemple de cela est la théorie si débattue des ondulations lumineuses. Cette hypothèse identifie la lumière avec les autres formes du rayonnement et même avec le son, en montrant que tous les phénomènes ont cet élément commun (bien connu à l'expérience), la vibration ou l'onde, si l'on suppose un milieu matériel remplissant tout l'espace, dont la nature échappe complètement à l'expérience, et qui soit le véhicule des ondes lumineuses. Dans ce cas, comme dans tous les

1. *Problems of Life and Mind*, II, 7

2. *Princ. of science*, II, 138

cas semblables, l'identité réside non dans l'élément *fictif*, l'éther, mais dans l'élément *réel*, l'ondulation. Elle réside non dans l'*agent*, mais dans *la loi de son action*. Et il est évident que toute hypothèse qui établit des coïncidences entre des phénomènes dans des particularités purement fictives est totalement vaine, parce qu'elle n'est en aucune façon une identification de phénomènes. Elle est pire que vaine : elle n'a pas de sens ; c'est une pure collection de mots ou de symboles sans signification générale. Comme le dit Jevons ¹ : « Aucune hypothèse ne peut même être conçue dans l'esprit si elle n'est plus ou moins conforme à l'expérience. Comme la matière de nos idées est sans aucun doute dérivée de la sensation, nous ne pouvons nous figurer aucune existence, aucun agent qui ne soit doué de quelques-unes des propriétés de la matière. Tout ce que l'esprit peut faire en créant de nouvelles existences, c'est de changer les combinaisons, ou, par analogie, de changer l'intensité des propriétés sensibles. » J.-S. Mill est donc évidemment dans l'erreur quand il dit ² : « Une hypothèse étant une simple supposition, il ne peut pas y avoir aux hypothèses d'autres limites que celles de l'imagination humaine » ; et : « Nous pouvons imaginer, si nous voulons, pour rendre compte d'un effet, quelque cause d'une nature complètement inconnue et agissant d'après une loi absolument fictive. » Le défaut de la dernière partie de cette proposition est évidemment senti par Mill lui-même, car il ajoute à la fin de la phrase suivante : « Il n'y a *probablement* pas d'hypothèse, dans l'histoire de la science, dans laquelle l'agent lui-même et la loi de son action soient également fictifs. » Il n'y a *certainement* aucune hypothèse semblable, — aucune, tout au moins, qui ait servi en quelque manière les intérêts de la science.

Une hypothèse peut envelopper non-seulement une, mais plusieurs suppositions fictives, pourvu qu'elles mettent en relief, ou rendent probable, ou tout au moins possible, un accord entre des phénomènes sur un point qui soit réel et observable. Ceci est surtout légitime quand l'accord ainsi mis en lumière existe non-seulement entre deux, mais entre un plus grand nombre de phénomènes, et encore davantage quand l'accord a

1. *Princ. of science*, II, 141.

2. *Logic*, 8^e éd., p. 394.

lieu non-seulement pour une, mais pour plusieurs particularités réelles entre les divers phénomènes, de sorte que, aux termes de Whewell ¹, « les hypothèses faites pour une classe de cas se trouvent en expliquer une autre de nature différente, — coïncidence d'induction ». Un exemple de ceci est fourni par l'hypothèse, citée plus haut, de l'éther luminifère, qui d'abord parut expliquer le retard des comètes. Mais tandis que la probabilité de la vérité d'une hypothèse est en raison directe du nombre des phénomènes ainsi mis en rapport, elle est en raison inverse du nombre des fictions, ou, plus exactement, son improbabilité s'accroît géométriquement, tandis que la série des fictions indépendantes se développe arithmétiquement ². On trouve encore un exemple de ceci dans la théorie des ondes lumineuses. La multitude des suppositions fictives que renferme cette hypothèse, jointe à l'échec des coïncidences par lesquelles elle paraissait d'abord se distinguer, peut difficilement être considérée autrement que comme un obstacle à sa validité dans sa forme présente. Quelque disposés que nous soyons à accéder aux désirs des théoriciens, — quand ils veulent faire admettre que tout l'espace est rempli et que toute matière sensible est pénétrée par un solide plus dur que le diamant, exerçant à chaque point de l'espace une force élastique 1,148,000,000,000 fois égale à celle de l'air à la surface

1. *History of the Inductive Sciences* (éd. Améric.), II, 186.

2. « En général, dit Cournot (*De l'enchaînement, etc.*, I, 403), une théorie scientifique quelconque, imaginée pour relier un certain nombre de faits donnés par l'observation, peut être assimilée à la courbe que l'on trace d'après une loi géométrique, en s'imposant la condition de la faire passer par un certain nombre de points donnés d'avance. Le jugement que la raison porte sur la valeur intrinsèque de cette théorie est un jugement probable, une induction dont la probabilité tient d'une part à la simplicité de la formule théorique, d'autre part au nombre des faits ou des groupes de faits qu'elle relie, le même groupe devant comprendre tous les faits qui s'expliquent déjà les uns par les autres, indépendamment de l'hypothèse théorique. *S'il faut compliquer la formule à mesure que de nouveaux faits se révoltent à l'observation elle devient de moins en moins probable en tant que loi de la Nature*; ce n'est bientôt plus qu'un échafaudage artificiel qui croule enfin lorsque, par un surcroît de complication, elle perd même l'utilité d'un système artificiel, celle d'aider le travail de la pensée et de diriger les recherches. Si au contraire les faits acquis à l'observation postérieurement à la construction de l'hypothèse sont reliés par elle aussi bien que les faits qui ont servi à la construire, si surtout des faits prévus comme conséquences de l'hypothèse reçoivent des observations postérieures une confirmation éclatante, la probabilité de l'hypothèse peut aller jusqu'à ne laisser aucune place au doute dans un esprit éclairé. »

de la terre, et une pression de 17,000,000,000,000 livres¹ par pouce carré — solide qui, en même temps, échappe complètement à nos sens, est entièrement impalpable et n'offre pas de résistance appréciable aux mouvements des corps ordinaires, — nous sommes épouvantés quand on nous dit que la prétendue existence de ce milieu adamantin, l'éther, n'explique pas, après tout, les irrégularités dans les périodes des comètes; que, de plus, non-seulement l'éther lumineux supposé est inefficace comme milieu pour la production et la propagation des phénomènes d'électriques, de sorte que, pour ceux-ci, on doit admettre² un éther électrifère distinct remplissant l'espace, mais encore qu'il est très discutable que la supposition d'un seul milieu éthéré soit capable de rendre compte de tous les faits connus en optique (par exemple, la non-interférence de deux rayons, originalement polarisés dans des plans différents, quand on les met dans le même plan de polarisation, et certains phénomènes de double réfraction en vue desquels il est nécessaire de supposer que la rigidité du milieu varie avec la direction du mouvement, supposition que déconcertent les faits relatifs aux intensités de la lumière réfléchie); enfin que, pour l'explication complète des phénomènes de la lumière, il « faut considérer ce que nous appelons l'éther comme composé de deux milieux possédant chacun une répulsion spontanée ou élasticité égale et énorme, et existant tous deux en quantité égale à travers tout l'espace, milieux dont les vibrations se produisent dans des plans perpendiculaires, et qui sont indépendants l'un de l'autre, ne s'attirant pas et ne se repoussant pas³ ». Cette superfétation sans fin de milieux éthérés s'ajoutant à l'espace et à la matière ordinaire fait malencontreusement penser aux trois sortes de substances

1. Cf. Herschel, *Familiar Lectures*, etc., p. 282; J. de Wrede (Président de l'Académie Royale des sciences de Stockholm), Discours, *Phil. Mag.*, 4^e série, vol. XLIV, p. 82.

2. W. A. Norton, *On Molecular Physics*, *Phil. Mag.*, 4^e série, vol. XXIII, p. 493.

3. Hudson, *On Wave Theories of Light, Heat, and Electricity*, *Phil. Mag.* (IV), vol. XLIV, p. 210 seq. Dans cet article l'auteur signale aussi la grossièreté des hypothèses subsidiaires qui ont été inventées pour obvier à d'autres difficultés de la théorie des ondes, entr'autres celles qui ont été discutées dans le chapitre précédent. • Les ondes sonores, dit-il, dans notre atmosphère, ont une durée égale à 10,000 fois celle des ondes lumineuses, et leur vitesse de propagation est environ 850,000 fois moindre, et, même quand l'air a été élevé

éthérées supposées également par Leibnitz et Descartes comme base de leurs systèmes de tourbillons. C'est au moins un tourbillon de notre pensée qui nous pousse, dans l'intérêt de la forme reçue de la théorie des ondes, non-seulement à rejeter toutes les présomptions venant de notre commune observation et de toutes les analogies de l'expérience, mais à accumuler des hypothèses et des éthers indéfiniment. Nous ne sommes qu'à moitié rassurés par cette circonstance que la théorie en question, outre qu'elle rend compte des phénomènes d'optique qui avaient été observés au temps de sa promulgation, a le grand mérite de la prévision vérifiée, ayant conduit à prédire plusieurs faits découverts plus tard. Sans doute, ces prédictions n'ont pas seulement été nombreuses; plusieurs d'entre elles sont très frappantes; par exemple: l'annonce de la réfraction conique (vérifiée plus tard par Lloyd) et la prévision de Fresnel (d'après la forme d'une formule algébrique) de la polarisation circulaire après deux réflexions internes dans un rhombe. Mais, quoique des prophéties de cette espèce puissent justement accréditer une hypothèse, elles ne sont, en aucune manière, Mill l'a montré¹, des preuves absolues de leur vérité. En prenant le mot « cause » au sens où on le comprend généralement, un effet peut être dû à l'une quelconque de plusieurs causes, et, par suite, on peut, dans beaucoup de cas, en rendre compte par l'une quelconque de plusieurs hypothèses opposées. Cela devient évident au premier regard jeté sur l'histoire de la science.

à une température à laquelle la matière émet des ondes de lumière rouge, la vitesse des ondes sonores ne devient que le double de ce qu'elle était à 00° centigrade. Même leur vitesse à travers le verre est 55,000 fois moindre que celle des ondes d'éther, et l'extrême lenteur du changement de température dans la conduction de la chaleur (en comparaison de la rapidité avec laquelle les vibrations de l'éther s'épuisent, car elles deviennent insensibles presque instantanément après que l'action de la cause a cessé) marque distinctement la différence essentielle qu'il y a entre les vibrations moléculaires et les vibrations de l'éther. Cela me paraît donc être une très grossière hypothèse que d'imaginer une combinaison des vibrations éthéro-moléculaires pour rendre compte de la très faible différence dans le retard des rayons deux fois réfractés dans les cristaux.

1. *Logic*, p. 356. Longtemps avant Mill, Leibnitz observait que le succès dans l'explication (ou la prédiction) des faits ne prouve pas la validité d'une hypothèse, attendu que des conclusions justes peuvent être tirées de prémisses fausses — comme le dit Leibnitz « comme le vrai peut être tiré du faux ». Cf. *Nouveaux Essais*, ch. xvii, sec. 5. — Leibnitz, opp. éd. Erdmann, p. 397.

Quand une hypothèse explique avec succès plusieurs phénomènes en rapport avec lesquels elle a été construite, il n'est pas étrange qu'elle explique aussi d'autres phénomènes liés avec les premiers, et qui sont subséquemment découverts. Presque toutes les théories physiques abandonnées peuvent se vanter d'avoir prévu des phénomènes qui ont été ensuite observés; citons parmi elles la théorie de l'électricité à un seul fluide et la théorie des corpuscules lumineux.

Il y a d'ailleurs d'autres conditions de la validité d'une hypothèse que je n'ai pas encore fait remarquer. Entr'autres celles qu'ont spécifiées Sir W. Hamilton, Mill, Bain et autres, par exemple qu'une hypothèse ne doit pas être contradictoire avec elle-même ni avec les lois connues de la nature — (cette condition est cependant un peu douteuse, en ce sens que les lois en question peuvent être des inductions incomplètes de l'expérience passée, et que les éléments postulés par l'hypothèse doivent compléter); — qu'elle doit être de nature à admettre des inférences déductives, etc. Il n'est pas nécessaire pour le but que je me propose de m'étendre sur tout cela. Les deux conditions que j'ai cherché à accentuer et à mettre en lumière sont, à mon avis, suffisantes pour juger de la validité et de la valeur de la théorie cinétique des gaz.

Le fait fondamental dont cette théorie doit rendre compte est que les gaz sont des corps qui, à la même température, et en l'absence de pression extérieure, ont la même force d'expansion. Les deux grandes lois empiriques, ou soi-disant telles, exprimant les propriétés physiques d'un gaz directement attestées par l'expérience, sont les conséquences nécessaires et immédiates de ce fait, attendu qu'en réalité elles n'en sont que l'expression partielle et complémentaire. La limite du volume d'un gaz n'étant produite que par la pression — car la cohésion d'une masse de gaz est due *uniquement* à la pression — il en résulte qu'il doit lui être proportionnel; en d'autres termes que le volume d'un gaz doit être en raison inverse de la pression; et c'est là la loi de Boyle ou de Mariotte. En outre, la température se mesure par la dilatation uniforme d'une colonne de gaz (dans le thermomètre à air); d'où il suit que, si tous les gaz ont la même force de dilatation, la tem-

pérature est proportionnelle au volume d'un gaz et réciproquement ; c'est la loi de Charles ¹.

La définition réelle qui précède (c'est-à-dire la mise en lumière des propriétés) d'un gaz ne s'applique qu'aux gaz idéaux et parfaits. Dans l'expérience actuelle nous ne rencontrons pas de gaz qui, en l'absence de pression, se dilate avec une uniformité absolue ; et pour cette raison nous ne connaissons expérimentalement aucun gaz qui se comporte strictement selon les lois de Boyle et de Charles. De plus, nous sommes incapables d'observer directement un gaz complètement libre de pression ; la donnée de l'expérience est simplement que les gaz se dilatent (toutes choses égales d'ailleurs) proportionnellement

1. Un des incidents les plus étranges de l'histoire de la physique est la grave discussion de la question relative à la vraie loi de la dilatation des gaz. • D'après Gay-Lussac, dit Balfour Stewart (*Treatise on Heat*, p. 60), l'augmentation de volume que reçoit un gaz quand la température augmente de 1° est une certaine proportion fixe de son volume initial 0° C. ; tandis que, d'après Dalton, un gaz à une température quelconque augmente de volume pour une élévation de 1° par une fraction constante de son volume à cette température. . . La dilatation des gaz a depuis été étudiée par Rudberg, Dulong et Petit, Magnus et Regnault, et le résultat de leurs travaux ne laisse guère de doute que la méthode de Gay-Lussac pour exprimer la loi est beaucoup plus près de la vérité que celle de Dalton. • Etant donné que les expériences de Rudberg et autres étaient nécessairement faites sur cette supposition que le coefficient de dilatation était le même pour tous les gaz (la question étant relative non à la dilatation de quelque gaz particulier, mais à celle des gaz en général), étant donné que les températures étaient mesurées avec le thermomètre à air, il aurait été vraiment surprenant que le résultat eût confirmé les vues de Dalton. Un thermomètre est gradué en divisant une longueur donnée d'un tube de diamètre uniforme en parties égales. Il est donc clair que l'accroissement de volume résultant de la dilatation de l'air dans un tel tube sur une longueur de 1 degré est une partie fixe d'un volume constant pris à l'origine, et non d'un volume croissant d'une façon constante ; et la même chose est d'ailleurs vraie de tout autre gaz, s'il se dilate de la même manière. La forme donnée à la loi par Dalton donnerait la remarquable série suivante de rapports égaux — dont le premier représente la valeur de la dilatation de l'air dans le thermomètre et les autres la valeur (ou plutôt les valeurs) de la dilatation du gaz examinée (a étant la dilatation linéaire de l'air dans le thermomètre, v son volume initial, a' la dilatation correspondante dans le gaz examiné, v' son volume initial) :

$$\frac{a}{v} = \frac{a'}{v'} = \frac{a'}{v' + a'} = \frac{a'}{v' + 2a'} = \frac{a'}{v' + 3a'} = \frac{a'}{v' + 4a'} \text{ etc., etc.}$$

Les essais de solution expérimentale de la question ici indiquée suggèrent, chemin faisant, un doute sur la correction des systèmes reçus de thermométrie qui sont fondés sur la supposition de l'égalité des rapports de volume dans lesquels un terme est constant tandis que l'autre est variable, c'est-à-dire de fractions qui ont les mêmes numérateurs, mais des dénominateurs différents. Ce doute n'est pas parfaitement dissipé par cette réflexion que les diamètres de nos tubes thermométriques sont très petits.

à la diminution de la pression à laquelle ils sont soumis. Mais dans le cas de beaucoup de gaz — ceux qui sont tout à fait permanents, ou qui ne sont coercibles (c'est-à-dire, réductibles à l'état liquide ou solide) qu'avec grande difficulté, et presque tous les gaz à des températures très élevées — la déviation de l'uniformité de dilatation est très légère.

Or comment la théorie cinétique des gaz explique-t-elle le fait ou les faits d'expérience ci-dessus indiqués ? Elle prétend les expliquer en s'appuyant au moins sur trois suppositions arbitraires, dont pas une n'est une donnée de l'expérience, à savoir :

1. Un gaz est composé de particules solides indestructibles ayant une masse et un volume constants.

2. Ces particules constituantes sont absolument élastiques.

3. Ces particules sont en mouvement perpétuel, et, si ce n'est à de très petites distances, n'agissent en aucune façon les unes sur les autres, de sorte que leurs mouvements sont absolument libres, et par conséquent rectilignes.

Je m'abstiens d'ajouter une quatrième supposition — celle de l'égalité absolue des particules, au moins en masse — parce qu'elle est, à ce que l'on prétend (sans pouvoir en rendre compte) un corollaire des autres suppositions.

La première de ces suppositions a été suffisamment examinée dans le dernier chapitre. La seconde supposition affirme l'élasticité absolue des particules solides constituantes. Quel est le sens et le but de cette supposition ? L'élasticité d'un corps solide est cette propriété par laquelle il occupe, ou tend à occuper, une portion d'espace d'un volume et d'une forme déterminés, et par suite réagit contre toute force ou action produisant, ou tendant à produire une altération de ce volume ou de cette figure, avec une force ou action opposée qui dans le cas de l'élasticité parfaite est exactement proportionnelle à la force agressive. Or, on voit de suite que la propriété — le *fait* — ainsi supposé dans les corps constituants solides, renferme le fait même dont il s'agit de rendre compte dans le gaz. Un gaz parfait réagit contre une action tendant à réduire son volume avec une force proportionnelle à l'action ; et pour cette raison les gaz se définissent par les termes de fluides élastiques. Cette résistance du gaz contre la diminution de volume est évidemment un fait plus simple que la résistance d'un so-

lide contre la diminution *ou l'accroissement* de volume *jointe à la réaction contre un changement de forme*. La résistance à *plusieurs* espèces de changements implique un plus grand nombre de forces, et est par conséquent un phénomène plus complexe, que la résistance à *une seule* espèce de changement ¹.

On voit ainsi que la présupposition d'une élasticité absolue dans les solides dont l'agrégat est censé constituer un gaz, est une violation flagrante de la première condition de la validité d'une hypothèse — de cette condition qui exige une réduction du nombre des éléments sans relation dans le fait à expliquer, et par suite interdit une pure reproduction de ce fait sous la forme d'une supposition, et *a fortiori* la substitution de plusieurs suppositions arbitraires à un seul fait. Manifestement l'explication offerte par l'hypothèse cinétique, puisque sa seconde supposition nous ramène au phénomène même dont elle part, le phénomène de l'élasticité, est simplement (comme l'explication de l'impénétrabilité ou de la combinaison des éléments en proportion définie par la théorie atomique) l'explication *idem per idem*, et le contraire d'un procédé scientifique. C'est une pure *versatio in loco* — c'est se mouvoir sans avancer. Elle est complètement vaine ; ou plutôt, comme elle complique les phénomènes qu'elle prétend expliquer, elle est pire que vaine ; — elle intervertit complètement l'ordre de l'intelligence, elle résout l'identité en diversité, elle disperse l'un en multiple, elle embrouille le simple en complexe, elle interprète le connu par l'inconnu, elle élucide l'évident par le mystérieux, elle réduit un fait ostensible et réel à un fantôme obscur et chimérique ².

1. On peut dire que la simplicité plus grande des propriétés des gaz est purement conceptuelle. Identifier des concepts avec des faits, telle est indubitablement la grande erreur fondamentale de la spéculation ; mais nous nous occupons maintenant des éléments conceptuels de l'hypothèse en discussion. Cette opinion qu'un solide de volume constant (ou plus exactement, d'un volume variable, se dilatant ou se contractant jusqu'à un volume fixe *proprio motu*) est une chose plus simple qu'un corps se dilatant uniformément, n'est certainement pas fondée sur un fait d'expérience ; c'est un pur préjugé de l'esprit, tenant à cette idée qu'un corps en repos est un phénomène plus simple qu'un corps en mouvement uniforme et généralement que le repos est plus simple que le mouvement. Ce préjugé a sa racine dans notre oubli habituel de relativité essentielle de tous les phénomènes, qui sera discutée plus loin.

2. Tous les théoriciens qui essaient de rendre compte d'un fait physique en

Je passe la question déjà discutée, si la solidité et la constance de volume, supposées absolues, des prétendues particules constituantes peuvent s'accorder, d'après les principes de la théorie mécanique, avec leur élasticité absolue. Je vais discuter la troisième supposition de l'hypothèse cinétique. Cette supposition vient inévitablement accroître la complication théorique initiale du phénomène d'élasticité produite par la substitution arbitraire de la réaction d'un solide contre l'accroissement ou la diminution du volume et le changement de forme à la réaction d'un gaz contre la diminution de volume seule. Pour se débarrasser d'un trait gratuit de l'hypothèse (l'addition du rebondissement contre la dilatation et la déformation à celui contre la compression), et pour le mettre en conformité avec le fait à expliquer, il devient nécessaire d'y ajouter un autre trait arbitraire — de douer les particules d'un mouvement rectiligne incessant dans toutes les directions. Au sujet de cette supposition, — qui est basée, comme les autres suppositions de la théorie mécanique, sur la négligence complète de la relativité et, par suite, de la dépendance mutuelle des phénomènes naturels, — il est évident qu'elle est tout à fait gratuite et tout à fait dépourvue non seulement de garantie expérimentale, mais aussi de toute analogie avec l'expérience. Des corps qui, excepté à la limite même du contact immédiat, se meuvent indépendamment, sans attraction ni répulsion, ni aucune espèce d'action mutuelle, et présentent ainsi la réalisation parfaite du concept abstrait de mouvement rectiligne libre et incessant, ces corps sont des étrangers inconnus dans le large domaine de

multipliant des suppositions arbitraires dans lesquelles le fait lui-même est reproduit tombent sous le reproche ingénieux qu'Aristote faisait à la doctrine platonicienne des idées. Leurs efforts sont aussi frivoles que ceux d'une personne qui, pour faciliter un calcul, commencerait par multiplier ses nombres. — Οἱ δὲ τὰς ἰδέας αἰτίας τιθέμενοι πρῶτον μὲν ζητοῦντες τινὸς τῶν ὄντων λαθεῖν τὰς αἰτίας ἕτερα τούτοις ἴσα τὸν ἀριθμὸν ἐκόμισαν ὥσπερ εἰ τις ἀριθμῆσαι βουλόμενος ἐπαγγόνων μὲν ὄντων οἴοιτο μὴ εὐνήσασθαι, πλείω δὲ ποιήσας ἀριθμοῖν. Met., A 9,990 et seq. La règle d'Occam : « Entia non sunt multiplicanda præter necessitatem », a ses applications en physique aussi bien qu'en métaphysique ; et il y a des doctrines physiques dont Michel Montaigne, s'il vivait aujourd'hui, dirait ce qu'il disait de certaines erreurs scolastiques, il y a trois cents ans : « On échange un mot pour un autre mot, et souvent plus incogneu... Pour satisfaire à un doute, ils m'en donnent trois ; c'est la teste d'Hydra... nous communiquons une question ; ou nous en redonne une ruchée ». *Essais*, III, 13.

l'expérience sensible. Un abandon si complet des analogies de l'expérience n'est que plus surprenant si l'on considère cette circonstance que l'hypothèse atomique, dont la théorie cinétique des gaz est une branche, est ouvertement un ensemble d'idées suggérées par la mécanique céleste. Il n'y a guère de traités sur la physique moderne où les atomes et les molécules ne soient comparés aux systèmes stellaires ou planétaires. « Un atome composé, dit Stanley Jevons¹, pourrait être comparé à un système stellaire, chaque étoile étant elle-même un système plus petit. » Mais les corps dont s'occupe la mécanique céleste sont tous soumis à la loi d'attraction ; et le sens du tout premier théorème des principes de Newton est que ces corps, si leurs mouvements à un moment quelconque ne sont pas selon la même droite, ne peuvent jamais se heurter, mais doivent toujours se mouvoir dans des orbites courbes à distance les uns des autres. Les chocs obliques produisant des rotations ainsi que des déviations de la direction antérieure à ce choc, comme l'ont imaginé Clausius et les autres promoteurs de la théorie cinétique sont impossibles. Et cela n'est pas seulement vrai quand les actions mutuelles des corps varient en raison inverse des carrés de leur distance, mais encore toutes les fois qu'ils varient proportionnellement à une puissance supérieure de ces distances, — propositions à retenir en vue de certaines spéculations de Boltzmann, Stefan, et Maxwell dont je vais parler.

Il y a un autre trait fort extraordinaire, et invérifiable à la lumière de tous les enseignements de la science, dans la supposition relative aux mouvements des prétendues particules solides constituantes. Je veux parler de la discontinuité absolue entre l'action mutuelle attribuée à ces particules pendant les courts instants qui précèdent ou suivent leur collision, et leur complète liberté à l'égard de toute action mutuelle pendant les périodes comparativement longues de leur mouvement rectiligne en « direction libre ». Et ceci me conduit à dire quelques mots au sujet de certaines suppositions subsidiaires faites par Maxwell et autres afin de rendre compte des anomalies que présentent les gaz de différents degrés de coercibilité dans leurs

¹. *Principles of science*, I, 453. Dans les *Untersuchungen über Molekularmechanik* d'Arwed Walter, p. 216, le système de Jupiter et ses satellites est appelé une « molécule planétaire ».

déviation de la loi de Boyle et de Charles. Maxwell suppose que les molécules de gaz ne sont ni strictement sphériques ni absolument élastiques, et que leurs centres se repoussent avec une force inversement proportionnelle à la cinquième puissance de leur distance¹; tandis que Stefan² s'efforce d'ajuster l'hypothèse aux phénomènes en question en admettant que les molécules sont des sphères parfaites absolument élastiques dont les diamètres sont inversement proportionnels aux rarités quatrièmes des températures absolues des gaz. Ces suppositions, — fatales pour toutes les prétentions à la simplicité émises en faveur de l'hypothèse cinétique, — ne sont en aucune manière le développement de ses postulats originaux; que l'une et l'autre restent purement gratuites, sans analogie avec l'expérience, et la première des deux, celle de Maxwell, est en opposition flagrante avec toutes les inductions faites dans toute l'étendue de l'observation actuelle. Toutes deux ne sont que des bouche-trous de l'hypothèse, des replâtrages pour l'accorder avec l'expérience, de pures inventions faites pour répondre aux difficultés créées par l'hypothèse elle-même.

Il serait inutile de passer en revue, en détail, les méthodes logiques et mathématiques par lesquelles on a tenté de tirer d'une hypothèse reposant sur de tels fondements des formules correspondant aux faits de l'expérience. Qu'on me permette de dire, cependant, que les méthodes de déduction ne sont guère moins extraordinaires que les prémisses. Pour rendre compte des lois de Boyle et de Charles on a recours au calcul des probabilités, ou, comme le dit Maxwell³, à la méthode des statistiques. Sans doute, dit-on, les molécules individuelles se meuvent avec des vitesses inégales, — soit que ces vitesses aient été originairement inégales, soit qu'elles le soient devenues par suite des rencontres. — Néanmoins, il y aura une moyenne de toutes les vitesses appartenant aux molécules d'un système (c'est-à-dire d'un corps gazeux), que Maxwell appelle « la vitesse du carré moyen ». La pression, dans cette supposi-

1. Depuis que ceci a été écrit, Maxwell lui-même a abandonné cette supposition comme non conforme aux faits.

2. *Ueber die dynamische Diffusion der Gase. Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Mathem. naturw. Classe*, vol. LXV, p. 323. Cf. aussi Boltzmann, *Ueber das Wirkungsgesetz der Molecularkräfte, Sitzungsberichte*, etc., vol. LXVI, p. 213.

3. *Theory of Heat*, p. 288.

tion, est proportionnelle au produit du carré de cette vitesse moyenne par le nombre des molécules multiplié par la masse de chaque molécule. Le produit du nombre des molécules par la masse de chaque molécule est alors remplacé par la densité, — en d'autres termes toute la supposition moléculaire est, à cet effet, abandonnée — et la vitesse est éliminée comme représentant la température; il en résulte, d'ailleurs, que la pression est proportionnelle à la densité.

Des procédés analogues conduisent à la loi de Charles et à la « loi » d'Avogadro (d'après laquelle le nombre des molécules dans deux volumes égaux de gaz quelconque est le même aux mêmes températures et aux mêmes pressions, loi qui n'est en elle-même qu'une pure hypothèse). On prétend, en s'appuyant encore sur la statistique, non-seulement que la vitesse moyenne de plusieurs molécules dans un gaz donné, est la même, mais que « si deux groupes de molécules dont la masse est différente, sont en mouvement dans le même vase, ils échangeront leur énergie, par leur rencontre, jusqu'à ce que l'énergie cinétique moyenne de *chaque molécule de chaque groupe* soit la même ¹ ». « Ceci, dit Maxwell, résulte de cette même recherche qui détermine la loi de la distribution des vitesses dans un seul groupe de molécules ». Tout ceci établi, la loi de Charles et la loi d'Avogadro (appelée par Maxwell la loi de Gay-Lussac) s'en déduisent facilement. A la fin de ces déductions tortueuses, Maxwell ajoute une dissertation sur les propriétés des molécules, dans laquelle il prétend avoir rendu évident que les molécules d'une même substance sont « inaltérables par le processus qui s'accomplit dans le présent état de choses, et tous les individus de la même espèce sont exactement de la même grandeur, que des balles sortant du même moule, et non pas seulement comme des grains de petit plomb, choisis et groupés par grosseur ». Par suite, comme Maxwell le dit ailleurs ², les molécules ne sont pas les produits d'une évolution quelconque, mais pour employer le langage de Sir John Herschel, « elles ont le caractère essentiel des produits manufacturés ».

De plus, sur quel fondement logique, mathématique ou

1. Maxwell, *l. c.*, p. 289, seq.

2. Bradford, *Lecture on the Theory of Molecules*, of *Popular Science Monthly*, janvier 1874.

autre applique-t-on la méthode statistique aux vitesses des molécules plutôt qu'à leurs poids et à leurs volumes ? Quelle raison donne-t-on, ou peut-on donner, pour laquelle les masses des molécules ne seraient pas soumises au même calcul de moyennes que leurs mouvements ? Il n'y en a pas. Et en l'absence d'une telle raison, les déductions de la théorie cinétique, outre qu'elles sont fondées sur des prémisses chancelantes, sont des paralogrammes trompeurs.

A ces considérations, je n'hésite pas à déclarer que l'hypothèse cinétique n'a aucun des caractères d'une théorie physique légitime. Ses prémisses sont aussi inadmissibles que le raisonnement fondé sur elles est peu concluant. Elle suppose ce qu'elle prétend expliquer ; elle donne une solution plus obscure que le problème — elle résout une équation par des racines imaginaires de quantités inconnues. Elle prétend être une explication alors qu'elle aurait tort de se vanter de laisser les faits là où elle les a trouvés, et elle tombe sous le coup de la vieille critique d'Horace :

Nil agit exemplum, item quod lite resolvit.

On a beaucoup parlé de l'appui que la théorie cinétique des gaz tire des révélations du spectroscope. Les spectres des gaz, contrairement à ceux des solides et des liquides, ne sont pas continus, mais consistent en lignes ou bandes colorées distinctes, — ce qui prouve, prétend-on, que dans les gaz les vibrations des molécules n'interviennent pas ; que les gaz incandescents émettent des espèces distinctes de lumière et non (selon l'expression de Jevons) des bruits lumineux, parce qu'il n'y a pas de chocs de molécules troublant les périodes naturelles de vibration¹. Le spectroscope est sans doute le plus important témoin jusqu'ici invoqué en faveur de la théorie cinétique ; mais le témoignage de ce témoin n'est pas tout en sa faveur. « Le spectroscope », dit Maxwell lui-même²,

1. D'après la dernière interprétation des phénomènes spectroscopiques, la continuité ou discontinuité d'un spectre indique, non pas tant l'état d'aggrégation, que la complexité moléculaire du corps examiné. On dit qu'un corps donne un spectre de lignes quand ses molécules ne contiennent qu'un petit nombre d'atomes chacune ; que, quand elles en contiennent davantage, le spectre présente l'apparence de bandes cannelées, et que le spectre est continu quand chaque molécule comprend un grand nombre d'atomes.

2. *On the Dynamical Evidence of the Molecular Constitution of Bodies*, *Nature*, 4 et 11 mars 1875, n° 279, 280.

« montre que des molécules peuvent exécuter un grand nombre d'espèces de vibrations différentes. Elles doivent donc être des systèmes d'une complexité très considérable, ayant bien plus de six variables. Or, chaque variable ajoutée introduit une nouvelle somme de capacité de mouvement interne sans accroître la pression extérieure. Chaque variable ajoutée accroît donc la chaleur spécifique, qu'on la constate à pression constante ou à volume constant. Il en est de même de toute capacité que la molécule peut avoir d'emmagasiner de l'énergie sous la forme potentielle. Mais la chaleur spécifique calculée est déjà trop grande quand nous supposons la molécule composée de deux atomes seulement. De là, chaque degré de complexité que nous attribuons de plus à la molécule ne peut qu'accroître la difficulté qu'il y a à concilier la valeur observée avec la valeur calculée de la chaleur spécifique ».

Il peut paraître étrange que tant de maîtres de la recherche scientifique, instruits dans les écoles sévères de la pensée exacte et de l'analyse rigoureuse, aient perdu leurs efforts à une théorie si manifestement contraire à toute rigueur scientifique — hypothèse dans laquelle la chose même à expliquer n'est qu'une petite partie des suppositions destinées à l'expliquer. Mais les esprits des hommes de science eux-mêmes sont hantés par des restes d'idées pré-scientifiques, dont la moindre n'est pas cette erreur invétérée que l'on peut se débarrasser du mystère qui entoure un fait en fractionnant ce fait, et en le reléguant aux régions de l'extra-sensible. Cette illusion que l'élasticité d'un atome solide a moins besoin d'explication que celle d'une masse gazeuse, est étroitement unie à cette idée que l'abîme entre le monde de la matière et celui de l'esprit peut être rétréci, sinon franchi, par une raréfaction de la matière, ou par sa résolution en « forces ». La littérature scientifique du jour abonde en théories qui sont au fond des essais pour convertir les faits en idées par voie de réduction ou de subtilisation. Tout essai de ce genre est frivole; le spectre intangible se trouve plus embarrassant à la fin que la présence tangible. La foi dans les esprits — disons-le avec tout le respect dû aux « démons » thermo-dynamiques de Maxwell et à la population de l'« univers invisible » — est folie en physique aussi bien qu'en philosophie.

CHAPITRE IX

RAPPORT DE LA PENSÉE AVEC LES CHOSES. — FORMATION DES CONCEPTS. — THÉORIES MÉTAPHYSIQUES

Il est devenu évident, j'imagine, dans le cours des précédentes discussions que, tandis que les sciences physiques modernes sont ouvertement un essai de réduire les phénomènes de la nature aux éléments de masse et de mouvement, et par là de montrer qu'ils sont des résultats ou des phases de l'action mécanique — prétendant, à ce titre, que c'est la seule manière de traiter de ces phénomènes qui ne soit pas métaphysique — néanmoins tous les départements de la science qui ont manifestement dépassé le premier degré de la classification s'appuient sur des suppositions et conduisent à des conséquences incompatibles avec l'objet de cet effort et avec les principes fondamentaux de la théorie mécanique. Nous nous trouvons donc nous-mêmes au milieu d'une confusion qui doit être éclaircie, si elle peut l'être, par une recherche sur l'origine de cette théorie et par une détermination de son attitude à l'égard des lois de la pensée et des formes et conditions de son évolution.

Le compte que rendent les psychologues et les logiciens ordinaires de la nature et des opérations de la pensée peut, pour ce qui concerne notre sujet, être résumé en quelques phrases. La pensée, dans son sens le plus général, consiste à établir ou à reconnaître des relations entre des phénomènes. Les principales de ces relations — en fait, le fondement de toutes les autres, telles que celles d'exclusion et d'inclusion, coexistence et succession, cause et effet, moyens et fin —

sont les relations d'identité et de différence. La différence entre les phénomènes est une donnée première de la sensation. C'est la base de l'acte même de la sensation. Hobbes a finement observé que « avoir toujours la même sensation et n'en avoir aucune, c'est tout un ¹. » « Nous ne connaissons une chose, dit J. S. Mill ², qu'en la sachant distincte de quelque autre ; toute conscience est la conscience d'une différence ; il faut donc au moins deux objets pour amener l'acte de conscience ; on ne voit ce qu'est une chose que par contraste avec ce qu'elle n'est pas. »

La perception de la différence phénoménale — (qui pourtant peut être, et se trouve dans la plupart des cas, remplacée par sa reproduction dans la mémoire) — forme la base ou la condition préalable de la pensée, mais la pensée proprement dite, la pensée discursive, exige la connaissance de l'identité parmi les différences phénoménales. Les objets sont *perçus* comme différents ; ils sont *conçus* comme identiques par l'attention que l'esprit applique à leur point ou à leurs points de concordance. Les objets de la connaissance se trouvent ainsi classés, les points de concordance, c'est-à-dire les propriétés qui leur appartiennent en commun, servant de base à cette classification. Quand le nombre des objets classés est grand et que certains d'entre eux ont plus de propriétés en commun que les autres, une hiérarchie de classes est formée. Les objets sont d'abord divisés en groupes (appelés par les logiciens *infimæ species*) embrassant chacun les objets caractérisés par le plus grand nombre de propriétés communes compatible avec leur différence ; ces groupes sont alors réunis et distribués en groupes plus élevés, ou espèces, ayant un moins grand nombre de propriétés communes, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on arrive au petit nombre de propriétés communes à tous les objets embrassés dans les *infimæ species* et les espèces supérieures. Ces propriétés servent à caractériser la plus haute classe, ou *summum genus*.

Il suit de là que, à mesure que nous montons l'échelle de la classification depuis les *infimæ species* jusqu'au *summum genus*, le nombre des objets embrassés dans les classes suc-

1. « Sentire semper idem et non sentire ad idem recidunt ». Hobbes, *Phy-sica*, IV, 25 (Opp. ed. Molesworth, vol. I, p. 324).

2. *Examination of sir William Hamilton's Phil.* (Amer. ed.), vol. I, p. 14.

cessives (espèces ou genres) augmente, tandis que le nombre des propriétés caractéristiques décroît. Or l'ensemble des propriétés caractéristiques d'une classe particulière s'appelle *concept*; le nombre des objets groupés sous chaque concept s'appelle son *extension* ou sa *largeur*; et le nombre des propriétés — ou attributs constitutifs d'un concept, — compris dans son *extension*, s'appelle sa *compréhension* ou *profondeur*. De là cette loi de la logique que plus l'extension d'un concept est grande, c'est-à-dire, plus est grand le nombre des objets désignés, plus sa compréhension est petite, c'est-à-dire le nombre des attributs inclus. Pour s'exprimer avec une exactitude mathématique, l'extension varie en proportion géométrique pendant que la compréhension varie en sens inverse suivant une proportion arithmétique ¹.

On voit facilement que le passage d'une classe inférieure (plus compréhensive, mais moins extensive) à une classe supérieure (plus extensive, mais moins compréhensive) s'effectue par la séparation progressive et l'union idéale de ces attributs que les classes respectives ont en commun. Ce procédé s'appelle abstraction.

C'est en ce sens que la pensée proprement dite a été définie « l'acte de connaître et de juger des choses par le moyen de concepts ² », un concept étant « une collection d'attributs réunis par un signe et représentant un objet d'intuition possible ³. » Cette définition d'un concept est cependant critiquable, comme trop large ou trop étroite. On peut dire d'un côté qu'elle est trop large, car elle s'applique à la série totale des attributs constituant la représentation mentale d'un seul objet, sans considérer s'ils sont communs avec un autre objet, aussi bien qu'à la sélection et collection factices d'attributs caractéristiques d'une classe, c'est-à-dire d'une pluralité d'objets. En d'autres termes, c'est une définition de *concepts singuliers* (exprimés par des termes singuliers) aussi bien que de *concepts généraux* (exprimés par des termes généraux, ou, comme dirait Mill, des noms de classe). Dans le langage des vieux logiciens, elle comprend les *infimæ species*, et peut

1. Pour une formule exacte de la loi en question, voyez Drobisch, *Neue Darstellung der Logik, Logisch-mathematischer Anhang* (3^e ed., p. 206)

2. Mansel, *Prolegomena Logica*, p. 22.

3. *Ibid.*, p. 60.

désigner un objet singulier ou une qualité singulière, sans avoir égard au fait ou au degré de sa généralité. Cette critique serait évitée en définissant un concept, avec sir William Hamilton ¹ « la connaissance du caractère général, du point ou des points par lesquels une pluralité d'objets coïncident. » D'autre part, le mot « concept » est très généralement employé dans un sens pour lequel la définition de Mansel est trop étroite. Les logiciens allemands, par exemple, désignent habituellement par le mot concept (Begriff), non seulement toute reproduction mentale d'une représentation des sens, en tant qu'elle est ou peut être un élément d'un jugement ou proposition logique, mais aussi le dernier résultat d'une série quelconque d'abstractions. Et les derniers résultats de l'abstraction, les *summa genera*, sont exclus par la définition de Mansel. Il n'est ni nécessaire ni possible d'entamer ici une discussion détaillée des questions que soulèvent ces divergences dans l'emploi des termes; je ne puis pas non plus m'arrêter à peser les objections récemment émises par Tauschinsky, Lotze, Sigwart, Wundt et autres contre la théorie de la conception fondée sur la classification et la subsomption. Les controverses sur ce point entre les logiciens de la vieille école et ceux de la nouvelle, aussi bien que les interminables disputes entre les nominalistes et les conceptualistes, auxquels J. S. Mill a consacré une si large place dans ses écrits ², sont au fond de pures guerres de mots, et les points de désaccord restent étrangers à la recherche dans laquelle je vais entrer. J'aurai occasion de revenir plus tard sur un ou deux de ces points; pour le présent, mon bref résumé de ce qui se rattache à la conception logique est destiné seulement à déterminer la signification de certains termes logiques que je suis contraint d'employer, pour le cas où cette signification ne ressortirait pas suffisamment du contexte.

Or, dans toute discussion des opérations de la pensée, il est de première importance d'avoir présentes à l'esprit les vérités irréfragables suivantes, dont quelques-unes — quoique toutes semblent évidentes, — n'ont pas été bien clairement comprises jusqu'à une époque très récente :

1. La pensée se réfère, non aux choses telles qu'elles sont

1. *Lectures on Logic*, p. 87.

2. Cf. Mill's, *Examination of Sir William Hamilton's Philosophy*, ch. xvii

en elles-mêmes, ou telles qu'on les suppose, mais aux représentations mentales que nous en avons. Ses éléments sont, non de vrais objets, mais les éléments intellectuels qui leur correspondent. Ce qui est présent à l'esprit dans l'acte de penser, ce n'est jamais une chose, mais toujours un ou plusieurs états de conscience. Quelque fréquemment et en quelque sens qu'on puisse prétendre que l'intellect et son objet sont l'un et l'autre des entités réelles et distinctes, on ne peut, pour un instant, refuser d'accorder que l'objet dont l'intellect a connaissance est une synthèse d'éléments objectifs et subjectifs, et figure ainsi dès l'origine, dans l'acte même de son appréhension et dans tout ce que comprend son existence connaissable affecté par les déterminations de la faculté de connaître. Donc toutes les fois que nous parlerons d'une chose ou d'une propriété d'une chose, il doit être bien entendu que nous voulons parler d'un produit de deux facteurs dont ni l'un ni l'autre n'est capable d'être appréhendé par lui-même. On dit dans ce sens que toute connaissance est relative.

2. Les objets nous sont connus seulement par leurs relations avec d'autres objets. Ils n'ont, et ne peuvent avoir de propriétés, et leurs concepts ne peuvent contenir d'attributs, en dehors de ces relations, ou plutôt des représentations que nous en avons. En réalité un objet ne peut être connu ou conçu autrement que comme un ensemble complexe de telles relations. En style mathématique : les choses et leurs propriétés ne sont connues que comme fonctions d'autres choses et d'autres propriétés. En ce sens aussi, la relativité est un prédicat nécessaire de tous les objets de la connaissance.

3. Une opération particulière de la pensée n'implique jamais la totalité des propriétés connues ou connaissables d'un objet donné, mais seulement celles d'entre elles qui appartiennent à une classe définie de rapports. En mécanique, par exemple, un corps est considéré simplement comme une masse, de poids et de volume (quelquefois de forme) déterminés. On ne s'occupe pas de ses autres propriétés physiques ou chimiques. De même, chacun des autres départements de la connaissance effectue une classification d'objets d'après ses propres principes particuliers, donnant par là naissance à différentes séries de concepts, dans lesquelles chaque concept représente l'attribut ou le groupe d'attributs — l'aspect de

l'objet — qu'il est nécessaire de mettre en vue pour la question qu'on traite. Ainsi, — pour employer le langage de Leibnitz, adopté par sir William Hamilton, et après lui par Herbert Spencer, — nos idées sont *symboliques*, non pas ou, du moins, non pas seulement parce qu'une représentation mentale complète des propriétés d'un objet est interdite par leur nombre et par l'impuissance où est l'esprit de les tenir simultanément embrassées, mais parce que beaucoup de ces propriétés, — souvent même la plus grande partie — n'ont pas de rapport avec l'opération mentale qui s'accomplit.

De plus, les attributs compris dans le concept d'un objet étant les représentations de ses relations avec d'autres objets, et le nombre de ces objets étant illimité, il en résulte que le nombre des attributs est aussi illimité et que, par conséquent, il n'y a pas de concept dont on puisse tirer toutes ses propriétés connaissables d'un objet. Dans cet ordre d'idées, il est à remarquer que l'expression classique ordinaire de la relation des concepts avec les jugements est sujette à une objection sérieuse. On dit qu'un jugement est « la comparaison de deux notions (concepts), d'où résulte la déclaration de leur convenance ou disconvenance » (Whately), ou « la reconnaissance de la relation d'accord ou de conflit entre deux concepts » (Hamilton). On suppose ici que les concepts préexistent à l'acte du jugement, et que cet acte ne fait que déterminer le fait ou le degré de leur accord ou de leur conflit. Mais la vérité est que chaque concept est le résultat d'un jugement ou d'une série de jugements, le jugement initial étant la reconnaissance d'une relation entre deux données de l'expérience. Dans la plupart des cas, en effet, un jugement est une comparaison de deux concepts ; mais tout jugement synthétique (c'est-à-dire tout jugement dans lequel le prédicat est plus qu'un simple développement d'un ou de plusieurs attributs possédés par le sujet) transforme les deux concepts qu'il met en relation, en restreignant ou en élargissant leurs sens respectifs ¹. Quand un enfant apprend « qu'une baleine est un mammifère », ses

1. Ceci n'a pas échappé à l'attention de sir William Hamilton, malgré sa définition du jugement, comme le montre le passage suivant de ses *Lectures on Logic* (Amer. ed., p. 84) : « Un concept est un jugement : car d'un côté il n'est que le résultat d'un jugement ou d'une série de jugements antérieurs, fixés et rappelés

notions de baleine et de mammifère subissent un changement matériel. Par suite du jugement de Thomas Graham que « l'hydrogène est un métal » le terme *hydrogène* et le terme *métal* prirent l'un et l'autre un sens nouveau. Cette affirmation de Sterry Hunt : — « de même que la dissolution est une combinaison chimique, de même la combinaison chimique est une dissolution mutuelle » — étendit le concept de *dissolution* ainsi que celui de *combinaison chimique*.

Il est clair, d'après ces considérations, que les concepts d'un objet donné sont les termes de séries innombrables, les anneaux de chaînes illimitées d'abstractions variant en espèce et en direction avec les comparaisons établies entre cet objet et les autres ; que le sens et le but de l'un quelconque de ces concepts dépendent, non-seulement du nombre, mais aussi de la nature des relations d'après lesquelles la classification des objets est faite ; et que, pour cette raison aussi, toutes les pensées des choses sont des représentations partielles et symboliques de réalités qu'il est impossible d'embrasser dans un acte ou une série d'actes de l'esprit. Et cela est vrai *a fortiori*, parce que les relations, dont tout objet de connaissance est l'ensemble, déjà infinies en nombre, sont de plus infiniment variables. Pour employer le langage d'Héraclite, toutes les choses sont dans un état de flux perpétuel.

Toute spéculation métaphysique ou ontologique est fondée sur la négligence de quelques-unes ou de toutes les vérités exposées ici. La pensée métaphysique consiste à essayer de déduire la vraie nature des choses des concepts que nous en avons. Quelle que soit la diversité qui existe entre les systèmes métaphysiques, ils sont tous fondés sur la supposition explicite ou implicite qu'il y a une correspondance fixe entre les concepts et leur filiation d'une part, et les choses et leur dépendance mutuelle de l'autre. Cette erreur fondamentale est

par un mot, un signe, et il est seulement amplifié par l'annexion d'un nouvel attribut, continuant le même progrès ». Parmi les penseurs allemands, Herbart a eu une vue claire de la même vérité. « Le développement des concepts, dit-il (*Lehrbuch zur Psychologie*, § 189), Werke, vol. V, p. 130) est le résultat lent et graduel d'une série progressive de jugements ». Dans un autre endroit (*id.*, *ib.*, § 78, Werke, V, 59) : « Reste à savoir si les concepts, au sens strictement logique, ne sont pas plutôt un idéal logique dont notre pensée doit se rapprocher de plus en plus... On verra d'ailleurs bientôt que c'est par les jugements que les concepts se rapprochent de plus en plus de l'idéal pour arriver enfin à un sens bien déterminé.

en grande partie due à une opinion fallacieuse sur le rôle du langage dans la formation et la fixation des concepts. En gros, les concepts sont la signification des mots; cette circonstance, que les mots désignent originairement des choses ou au moins des objets de sensation et leur action mutuelle sensible, a donné naissance à certaines suppositions trompeuses. Et, contrairement aux violations ordinaires des lois de la logique, ces suppositions forment, à certains points de vue, le développement naturel de l'évolution de la pensée et peuvent être appelées les erreurs *structurales* de l'intelligence. Elles ressemblent à cet égard aux maladies organiques du corps. Ces suppositions sont :

1. Que chaque concept est l'équivalent d'une réalité objective distincte, et que, par suite, il y a autant de choses ou de classes naturelles de choses qu'il y a de concepts ou de notions.

2. Que les concepts plus généraux ou plus extensifs et les réalités correspondantes préexistent aux concepts moins généraux, plus compréhensifs, et aux réalités correspondantes; et que ces derniers concepts et réalités sont dérivés des premiers, soit par addition successive d'attributs ou propriétés, soit par une évolution, les attributs ou propriétés des premiers étant considérés comme impliqués dans ceux des derniers.

3. Que l'ordre de la genèse des concepts est identique avec l'ordre de la genèse des choses.

4. Que les choses existent indépendamment de leurs relations et antérieurement à elles; que toutes les relations ont lieu entre des termes absolus; et que, par conséquent, toute la réalité qui appartient aux propriétés des choses est distincte de celle qui appartient aux choses elles-mêmes...

A l'aide de ces préliminaires, j'espère pouvoir assigner à la théorie mécanique son vrai caractère et sa vraie place dans l'évolution de la pensée. Mais, avant de procéder à cette tâche, il peut n'être pas sans intérêt, — à l'occasion de la recherche précédente sur le rapport entre les concepts et leurs objets correspondants, — de discuter cette question qui a longtemps été le sujet d'un vif débat : Si, et dans quelle mesure, la concevabilité est une preuve de réalité possible. J. S. Mill et ses disciples prétendent que notre incapacité de

concevoir une chose n'est pas une preuve de son impossibilité ; au contraire Whewell et Herbert Spencer soutiennent — non pas, il est vrai, strictement dans le même sens ni sur le même terrain — que ce qui est *inconcevable* ne peut pas être réel ou vrai ¹. Un jugement digne de foi sur la valeur de cette controverse ne peut être formulé qu'après une détermination soigneuse des conditions de la concevabilité, telles qu'elles sont indiquées par la nature du processus de conception que j'ai essayé de décrire.

On a vu que toute conception vraie consiste à établir des relations d'identité partielle ou totale entre le fait à concevoir et les autres faits connus de l'expérience. La première condition de la concevabilité est donc que la chose ou le phénomène en question soit susceptible de classification, c'est-à-dire d'identification totale ou partielle avec des objets ou des phénomènes préalablement observés.

Une seconde et très évidente condition de la concevabilité est que les éléments du concept à former ne soient pas contradictoires. Il est clair que deux attributs, dont l'un est la négation de l'autre, ne peuvent pas appartenir simultanément au même sujet, et être ainsi des parties du même concept.

Ce sont là les deux conditions qui se déduisent directement de la théorie de la conception, et peuvent par suite, avec quelque exactitude, être appelées conditions théoriques. Mais il y a une troisième condition pratique : Le nouveau concept ne doit pas être en contradiction avec les concepts préalablement formés sur la même matière. Comme je l'ai dit, c'est là une condition pratique — non pas tant une condition de concevabilité que de concevabilité facile. Car les anciens concepts peuvent être défectueux ou erronés ; et, précisément, le concept avec lequel ils sont en désaccord peut les compléter ou les supplanter, les rectifier ou les détruire.

Or, on voit aisément que l'accomplissement de la première condition ne peut pas être une preuve de réalité. Des faits ou

1. La forme précise du critère de la vérité de Spencer, qu'il appelle le « postulat universel » est « l'Inconcevabilité du contraire ». Exprimée dans le strict langage de la logique, sa thèse est que toute proposition dont la contradictoire est inconcevable doit être vraie. Mais puisque toute négation d'une proposition est l'affirmation de la contradictoire, ceci équivaut à cette formule générale que tout ce qui est inconcevable ne peut pas être vrai.

des phénomènes peuvent se présenter à l'observation, qui soient complètement différents de tous les faits ou phénomènes observés jusqu'alors, ou dont la ressemblance avec les données antérieures de l'expérience n'ait pas encore été aperçue. L'histoire de la science est pleine de découvertes qui surprennent ; chaque période de recherche active met en lumière des phénomènes non seulement imprévus, mais sans analogie apparente avec d'autres faits connus. C'est ce qui faisait dire à Liebig : « Le secret de tous ceux qui font des découvertes est qu'ils ne regardent rien comme impossible¹ ».

Jusqu'ici, je suis d'accord avec M. Mill. Mais je ne puis pas le suivre quand il rejette aussi l'accomplissement de la seconde condition comme *criterium* de possibilité, et refuse ou néglige de distinguer entre le cas d'inconcevabilité pour cause de désaccord apparent ou réel entre le nouveau fait ou phénomènes et les données de l'expérience passée, et le cas très différent d'inconcevabilité pour cause de désaccord entre les divers éléments d'un concept proposé. Il donne comme exemple de concept impossible à former celui de « carré rond » et allègue que cette impossibilité est due seulement à une expérience invétérée. « Si nous ne pouvons concevoir un carré rond, dit-il², ce n'est pas seulement parce qu'un tel objet ne s'est jamais présenté dans notre expérience, car cela ne suffirait pas ; autant que nous pouvons le savoir, les deux idées ne sont pas incompatibles en elles-mêmes. Concevoir un corps tout blanc et en même temps tout noir, ce serait seulement concevoir deux sensations différentes comme produites simultanément en nous par le même objet — conception familière à l'expérience — et nous serions probablement tout aussi bien capables de concevoir un carré rond qu'un carré dur ou un carré lourd, s'il n'était vrai que, dans notre expérience constante, au moment où une chose commence à être ronde, elle cesse d'être carrée, de sorte que le commencement d'une impression est inséparablement associé avec le départ ou la cessation de l'autre. Ainsi notre incapacité à former une conception vient toujours de ce que nous sommes

1. *Annalen der Pharmacie*, X, 179.

2. *Examination of the Philosophy of sir William Hamilton*, I, 88 ; Amer ed.

forcés d'en former une autre qui lui est contradictoire. »
 Notre incapacité à concevoir un carré rond est due à ce fait « que dans notre expérience constante, au moment où une chose commence à être ronde, elle cesse d'être carrée », et à l'association inséparable entre la rondeur qui commence et la forme carrée qui finit ! Je ne sais si jamais quelqu'un a eu un fait d'expérience comme celui dont il est parlé ; mais si cela est arrivé, je suis assuré que, même après avoir été renforcée par un vaste héritage d'expérience ancestrale, conformément à la théorie moderne de l'évolution, cette expérience se trouvera insuffisante pour rendre compte de l'association inséparable que Mill met en jeu. La simple vérité est qu'un carré rond est une absurdité, une contradiction dans les termes. Un carré est une figure limitée par quatre lignes droites égales se coupant à angles droits ; une figure ronde est une figure limitée par une courbe ; et la plus vieille définition d'une courbe est que c'est « une ligne qui n'est ni droite, ni composée de lignes droites ».

Le but de Mill est, en fait, sinon en paroles, de contester la validité des lois de non-contradiction et de milieu exclu, ou — suivant un langage qu'il préférerait, — d'affirmer que les lois fondamentales de la logique sont, comme tout ce qu'on appelle lois de la nature, des inductions purement expérimentales, l'uniformité de l'expérience étant leur seule preuve. Mais si ces lois ne s'imposent pas absolument et universellement comme principes constitutifs de la pensée et du langage — si la même chose peut, en même temps, être et ne pas être, et si l'affirmation et la négation de cette chose ne sont pas strictement alternatives — nous sommes bel et bien conduits dans les régions de l'absurdité complète, où toute pensée disparaît, où tout langage est dépourvu de sens. Les lois en question sont des principes constitutifs de la pensée distincte et du langage intelligible, parce qu'elles en sont des conventions préliminaires tacites ; elles ne doivent pas plus être suspendues en faveur de la théorie de l'association inséparable de Mill, qu'abrogées pour l'extension de la marche dialectique de Hegel.

Il faut dire qu'il y a, dans le même chapitre du livre de Mill que je viens de citer, des expressions montrant que l'auteur était très mal à l'aise en présence de sa propre

théorie. Il dit par exemple¹ : « Ces choses sont absolument inconcevables pour nous, nos esprits et notre expérience étant ce qu'ils sont. Seraient-elles inconcevables si nos esprits étaient les mêmes, mais notre expérience différente ? c'est un point ouvert à la discussion. Il est possible de faire une distinction que l'on trouvera, je pense, utile à la question. Qu'une même chose puisse à la fois être et ne pas être — ou, ce qui est la même chose, qu'une même proposition puisse être à la fois vraie ou fausse — cela n'est pas seulement inconcevable pour nous, *mais nous ne pouvons pas concevoir que cela puisse devenir concevable.* »

Chose étrange, que de pareilles phrases puissent venir de la plume de John Stuart Mill ! D'abord il nie que l'inconcevabilité soit, en aucun sens ni en aucun cas, une preuve de fausseté ou de non-réalité ; ensuite il dit qu'il peut en être autrement si l'inconcevabilité est elle-même inconcevable ! C'est-à-dire : un témoin est tout à fait indigne de créance ; mais quand il fait une déclaration sur sa propre véracité, on doit le croire.

Toute la théorie de l'association inséparable, telle qu'elle est ici avancée et appliquée par Mill est simplement dénuée de fondement, puisqu'il lui est impossible, d'après cette théorie, de savoir ce qu'a été l'expérience de ses nombreux lecteurs autrement que par une expérience qu'il ne pouvait pas avoir, la plupart de ses lecteurs lui étant entièrement inconnus. Et toute tentative de discussion avec qui que ce soit sur une telle base est une souveraine folie, Mill étant contraint, par sa propre doctrine, d'accepter la réponse, « Mon expérience a été autre, » comme concluante. La théorie de Mill se renverse ainsi elle-même, et toutes les phrases sérieuses qu'il a jamais écrites en sont la réfutation pratique.

À propos du cas d'inconcevabilité qu'on vient de discuter, et des autres analogues, il faut observer qu'une bonne part de l'embarras et de la confusion qui caractérisent les discussions entre Mill et ses adversaires, vient de ce que ceux-ci ont omis de distinguer entre les concepts purement formels et les représentations mentales des réalités physiques. Il y a une grande différence entre la relation d'un concept à l'objet de

1. *Loc. cit.*, p. 88.

la pensée en mathématiques, par exemple, et la relation correspondante entre le concept d'un objet matériel et cet objet lui-même. En mathématiques, comme dans toutes les sciences qui s'occupent simplement de relations ou de groupes de relations établies par l'esprit (et, dans les limites des lois constitutives de l'esprit, *arbitrairement* établies), certains concepts sont exhaustifs, en ce sens qu'ils impliquent, s'ils ne montrent pas explicitement, toutes les propriétés appartenant à l'objet de la pensée. Non seulement les éléments d'un tel objet, mais aussi les lois de leur dépendance mutuelle, étant déterminés par l'intelligence, un seul concept peut être développé en une série d'autres. Ainsi une parabole est une ligne dont tous les points sont également distants d'un point fixe et d'une droite donnée : c'en est un des concepts. Et dans ce concept, toutes les propriétés de la parabole — qu'elle est une section conique formée en coupant un cône parallèlement à une de ses génératrices, que la surface d'un segment quelconque est égale aux deux tiers du rectangle circonscrit, etc., — y sont impliquées, et peuvent en être déduites. Un de ses attributs implique tous les autres. Nos concepts d'objets matériels, au contraire, comme je l'ai montré, ne sont jamais exhaustifs, car l'ensemble de leurs attributs est nécessairement incomplet et variable. A quelles étranges fantaisies cette confusion a donné naissance dans d'autres branches de la spéculation ? c'est ce que nous verrons dans un chapitre ultérieur.

J'arrive maintenant à la troisième condition de la concevabilité : l'accord du concept qu'il s'agit de former avec les concepts antérieurs *in pari materia*. De beaucoup le plus grand nombre des cas cités d'inconcevabilité doivent être rapportés à la négligence de cette condition — à l'incompatibilité des faits nouveaux ou des vues nouvelles avec ce qui est déjà dans notre esprit. — La plupart des cas invoqués par Stuart Mill à l'appui de sa théorie, sont tirés de cette classe ; mais il ne saisit pas toujours leur vrai caractère, et sa théorie ne rend compte que très imparfaitement, ou même pas du tout, de la plupart d'entre eux. Un de ses exemples, c'est celui de la négation, autrefois presque universelle, de la possibilité des antipodes, à cause de leur inconcevabilité. D'après Stuart Mill, cette inconcevabilité s'est maintenant évanouie ; non

seulement nous les concevons facilement comme possibles, mais nous savons qu'elles sont réelles. Ce fait est assez vrai ; mais on en trouve l'explication, non dans la loi de l'association inséparable à laquelle Stuart Mill le rapporte, mais dans le concept erroné que se faisaient nos ancêtres de l'action de la pesanteur. Ils supposaient que la direction de la pesanteur était une direction absolue dans l'espace ; ils ne savaient pas que c'était une direction vers le centre de gravité de la terre ; le *bas* signifiait pour eux quelque chose de très différent du sens que nous attachons à ce mot. Ils ne pouvaient concilier avec ce concept erroné le fait que l'action de la pesanteur tenait nos antipodes en place aussi bien que nous-mêmes ; et nous ne le pourrions pas non plus. Mais nous avons un concept plus juste de la pesanteur, du mode et de la direction de son action ; la notion fautive, avec laquelle la notion des antipodes était incompatible, a été écartée, et l'inconcevabilité des antipodes a disparu.

Des observations semblables s'appliquent à un autre exemple proposé par Mill : l'impossibilité de concevoir l'*actio in distans*, dont on a longuement parlé dans un chapitre précédent. Cette impossibilité résulte de la contradiction de ce concept avec les notions qui ont prévalu sur la présence matérielle. Si nous renversons la proposition qu'un corps agit là où il est, en disant qu'il est là où il agit, l'inconcevabilité disparaît. L'une des plus sages paroles prononcées sur ce sujet est celle de Thomas Carlyle (cité par Mill lui-même à un autre endroit) : « Vous dites qu'un corps ne peut pas agir là où il n'est pas ? J'y consens volontiers ; mais, je vous prie, où est-il ? » D'ailleurs, une reconstitution, dans le sens ici indiqué, de nos concepts familiers de présence matérielle, exclurait la construction mécanique de la matière avec des éléments absolument limités, résistants, inaltérables, et séparés les uns des autres par des espaces absolument vides.

Il est à peine nécessaire d'ajouter que, généralement parlant, l'inconcevabilité d'un fait physique, par suite de son désaccord avec des notions préconçues, n'est pas une preuve de son impossibilité ou de sa non-existence. Le progrès intellectuel consiste presque toujours à rectifier ou renverser de vieilles idées dont un grand nombre ont été considérées comme évidentes pendant de longues périodes intellectuelles. Les

exemples de Mill déjà cités sont propres à mettre ceci en lumière ; et on pourrait les accumuler indéfiniment. Jusqu'à la découverte de la décomposition de l'eau, de la véritable combustion, et des affinités relatives du potassium et de l'hydrogène pour l'oxygène, il était impossible de concevoir une substance qui brûlât au contact de l'eau ; un des attributs reconnus de l'eau — en d'autres termes, une partie du concept d'eau — était qu'elle est le contraire du feu. Ce concept préalable était faux, et, quand il fut détruit, l'inconcevabilité d'une substance telle que le potassium disparut. De la même manière, nous sommes maintenant incapables de concevoir un animal à sang chaud sans un système respiratoire, parce que nous concevons la condition idiothermique d'un organisme animal comme dépendant principalement des changements chimiques qui s'y passent, dont le principal est l'oxydation du sang, ce qui exige un contact quelconque entre le sang et l'air, et par suite une forme quelconque de respiration. Si cependant des recherches futures détruisaient ce dernier concept — s'il était montré que la chaleur d'un corps vivant peut être produite en quantité suffisante par des agents mécaniques, tels que le frottement — un animal à sang chaud ne respirant pas deviendrait aussitôt concevable.

Ainsi, tandis qu'un phénomène physique, peut être réel, quelque peine que nous ayons à le concevoir sans faire violence à nos idées familières, il en est autrement dans le domaine des sciences formelles, telles que la logique et les mathématiques. Là nous trouvons des concepts fondés sur des postulats fondamentaux et des vérités axiomatiques, avec lesquels tous les nouveaux concepts doivent être d'accord pour être valides. Le fait est que, dans la sphère des relations idéales de l'espace et du temps, la troisième condition de la concevabilité est au fond identique à la seconde, en ce sens que là tous les concepts inférieurs sont, implicitement au moins, constitutifs de quelque concept supérieur, plus compréhensif, dont la validité exige leur accord mutuel. Tout ceci est également vrai de ces concepts purement formels qui constituent la base théorique de quelques-unes des sciences physiques, par exemple les propositions générales de la cinématique ou de la phoronomie ; dans les limites de leur juste application, elles sont des critères valables de possibilité.

Parmi les vérités physiques fondées sur l'induction, il y en a même beaucoup dont l'universalité est si bien établie qu'elles apportent une présomption forte, sinon décisive contre la légitimité des concepts et la réalité des prétendus phénomènes qui les détruiraient.

La discussion précédente, sur la concevabilité comme critère de vérité, n'épuise nullement le sujet. Il y a des questions connexes dans lesquelles il ne m'appartient pas d'entrer. Une de ces questions est la détermination des conditions auxquelles la contradiction entre les éléments d'un concept proposé devient apparente. Dans beaucoup de cas, la contradiction est latente et ne se montre qu'après la manifestation complète de tout ce qu'impliquent ces éléments, et de leurs rapports — explication familièrement connue sous le nom de *reductio ad absurdum*. En pareil cas, le procédé de raisonnement consiste, en effet, dans une réduction à leur dernier degré d'homogénéité, des propositions dans lesquelles le concept peut se résoudre, de sorte que leur opposition, si elle existe, devient visible. Mais les détails sur ce sujet appartiennent aux traités de logique.

CHAPITRE X

CARACTÈRE ET ORIGINE DE LA THÉORIE MÉCANIQUE. —

ELLE EST UN EXEMPLE DE LA PREMIÈRE
ET DE LA SECONDE ERREUR DE LA MÉTAPHYSIQUE

Les physiciens modernes prétendent évidemment que la théorie mécanique repose sur la base solide de l'expérience sensible, et qu'elle se distingue ainsi absolument de la spéculation métaphysique fondée, dit-on, — et cela est vrai au sens indiqué dans le chapitre précédent, — sur de pures fictions de l'esprit. Nous voici maintenant arrivés au point de notre discussion où la validité de cette prétention doit être examinée.

La théorie mécanique suppose la *masse* et le *mouvement* comme éléments absolument réels et indestructibles de toutes les formes de l'existence physique. On désigne d'ordinaire ces éléments sous le nom de *matière* et de *force*; mais cette dénomination est tout à fait inexacte. D'après la théorie mécanique, l'action de la force sur un corps, c'est simplement le transport du mouvement d'un corps à un autre. La force, au sens dans lequel le mot est employé ici, n'est pas autre chose que le mouvement considéré par rapport à sa transmission actuelle ou possible. Et son complément nécessaire, ou plutôt son corrélatif essentiel, — ce qui resterait si un corps était dépouillé de tout ce qui n'est ni une forme de la force, ni un mode du mouvement — ce n'est pas la *matière*, mais la *masse*.

Or, il est clair que le mouvement en lui-même n'est pas, et ne peut pas être, un objet d'expérience sensible. Nous avons

une connaissance expérimentale de corps qui se meuvent, mais non de mouvement pur. Et il est également clair que la masse — ou, pour employer le terme ordinaire, la *matière inerte*, ou *matière per se* — ne peut pas être objet d'expérience sensible. Les choses ne sont objets d'expérience sensible qu'en vertu de leur action et réaction. « Ce qui n'agit pas n'existe pas », dit Leibnitz. — *Quod non agit, non existit*. La masse n'est aucune des choses dont les sens ont une connaissance directe; elle ne se présente à eux ni comme volume, ni comme résistance, ni comme impénétrabilité. La seule connaissance que nous ayons de la masse dérive de ce que l'action de la même force ou la transmission du même mouvement produisent des vitesses, des accélérations ou des changements de mouvement différents dans différents corps (qui peuvent avoir le même volume et le même degré de résistance ou d'impénétrabilité). En dehors de la théorie atomique, masse n'est qu'un synonyme d'*inertie*; et celle-ci n'est connue, mesurée et déterminée que par la quantité de force ou de mouvement qui doit agir sur un corps donné, ou lui être communiquée, pour produire en lui une vitesse déterminée, — ou, en termes plus exacts et plus généraux, une quantité déterminée d'accélération ou de déviation. En dehors de son rapport et de son union avec la force, elle n'a pas d'existence, de même que la force et le mouvement n'ont pas d'existence en dehors de leur rapport et de leur union avec l'inertie. La réalité de l'un ne se présente à l'expérience comme à la pensée que par le moyen de l'autre.

La vérité est que ni la masse ni le mouvement ne sont substantiellement réels, mais que l'un et l'autre sont des concepts, ou plutôt les éléments d'un concept, le concept de *matière*. Ils sont des produits ultimes de généralisation — le point-limite des lignes d'abstraction qui partent des *infimæ species* de l'expérience sensible. La *matière* est le *summum genus* de la classification des corps fondée sur leurs propriétés physiques et chimiques. Elle n'est donc pas une chose réelle, mais l'ensemble idéal de deux attributs appartenant également à tous les corps. Ces deux attributs sont inséparables, non seulement en fait, mais aussi dans la pensée. Quand, en montant l'échelle de la classification, nous avons progressivement éliminé, dans nos représentations mentales des divers objets

physiques, tous les attributs par lesquels ils diffèrent, nous atteignons enfin deux attributs par lesquels ils concordent et qui ne peuvent être séparés sans dépasser les limites dans lesquelles la conception de la réalité physique est possible. Ils sont l'un et l'autre des composants indispensables du plus haut concept sous lequel une forme quelconque d'existence physique peut être admise.

Maintenant, le vrai caractère de la théorie mécanique apparaît du premier coup. Cette théorie prend non seulement le concept idéal de *matière*, mais ses deux attributs constitutifs inséparables, et suppose que chacun d'eux est une entité réelle et distincte. Ces concepts identifiés avec des objets réels et sensibles, ces abstractions confondues avec des choses, c'est là une des vieilles erreurs fondamentales de la spéculation métaphysique. C'est la première des suppositions trompeuses de la métaphysique énumérées dans le dernier chapitre¹. La théorie mécanique, aussi bien que toute autre théorie métaphysique, personnifie des groupes partiels, idéaux, et peut-être purement conventionnels, d'attributs, et les traite comme des variétés de la réalité objective. Sa base est donc essentiellement métaphysique. La théorie mécanique est en fait un reste du réalisme du moyen âge. Ses éléments substantiels sont des descendants logiques légitimes des *universalia ante rem* et *in re* des scolastiques; ils en diffèrent tout au plus en ceci qu'ils sont les sommets d'abstraction qu'on atteint en montant l'échelle des propriétés sensibles assurées par l'observation et l'expérience, et non en escaladant les hauteurs nuageuses des prédicables traditionnels représentant des fantaisies anciennes, grossières et vagues de l'esprit humain.

Le caractère métaphysique de la théorie mécanique n'apparaît cependant pas seulement en ce qu'elle adopte la première des hypothèses trompeuses de toute métaphysique, — à savoir que chaque concept est la contre-partie d'une chose réelle, — mais aussi dans la seconde de ces hypothèses, qui consiste² à croire, que les concepts les plus généraux, les plus étendus, et les réalités qui leur correspondent,

1. V. plus haut, p. 103.

2. V. plus haut, p. 103.

préexistent aux concepts moins généraux et aux réalités correspondantes, et que ces derniers concepts et réalités sont dérivés des premiers, soit par une addition d'attributs ou de propriétés, soit par une évolution progressive, les attributs et propriétés des premiers étant considérés comme impliqués dans ceux des derniers.

Dans les principaux systèmes métaphysiques, l'ordre de la réalité est complètement interverti. Les *Summa genera* de l'abstraction — les concepts les plus élevés — sont considérés comme les plus réelles de toutes les formes de l'existence et les données de l'expérience comme les moins réelles. Le fondement de cette erreur est que les premiers, qui renferment les propriétés communes à toutes choses, sont supposés constituer leur substance, c'est-à-dire le substratum permanent, invariable des propriétés par lesquelles les choses particulières se différencient, celles-ci étant regardées, à cause de leur variabilité, comme de purs accidents. D'après l'ancienne théorie de la relation des accidents à la substance, ou des attributs caractéristiques des concepts inférieurs à ceux des supérieurs, les concepts ou les réalités inférieurs sont formés par une addition successive d'attributs ou de propriétés aux concepts ou réalités supérieurs ; les variétés de la réalité objective sont considérées comme dues à une synthèse de la substance et des accidents ; par suite, cette théorie peut être appelée théorie *synthétique*. En regard de celle-ci se place la théorie *analytique*, plus moderne, qui se présente dans les systèmes évolutionnistes ou panthéistiques ; les formes conceptuelles inférieures ou formes réelles sont supposées contenues ou impliquées dans les formes supérieures, et dérivées d'elles par un processus d'évolution ou de développement. Tout ceci a son analogue exact dans la théorie mécanique. Il y a quarante ans, la croyance d'un physicien était ordinairement quelque chose comme ceci : A l'origine il existait, par un acte de création ou de toute éternité, des myriades de particules matérielles, résistantes et inaltérables. Il existait aussi certaines forces également inaltérables, telles que les forces d'attraction et cohésion, la chaleur, les forces électriques, magnétiques, chimiques, etc. A l'action constante ou variable, particulière ou concourante, de ces forces sur les particules matérielles, sont dus tous les phénomènes de la

réalité physique. Dans cette action les particules matérielles sont l'élément passif, et les forces l'élément actif; mais ces éléments, d'ailleurs, préexistent à l'action. La matière en elle-même est passive, morte; tout mouvement ou vie est causé par une force; et la seule solution possible des problèmes de la physiologie, aussi bien que de ceux de la physique et de la chimie, consiste dans l'énumération des forces agissant sur les particules matérielles et dans l'exacte détermination quantitative des effets produits par leur action.

Au fond cette croyance est évidemment une reproduction de l'ancienne métaphysique synthétique. Peu à peu, elle fait place à une nouvelle doctrine, qui est également une reproduction de la méthode métaphysique, — et que j'ai appelée le point de vue analytique ou évolutioniste. Les théories récentes sur la corrélation et la convertibilité mutuelle des forces, en vertu du principe de la conservation de l'énergie, ont ébranlé, sinon détruit, la notion d'une multiplicité de forces primitives indépendantes. De plus, des physiologistes, comme Du Bois-Reymond, reconnaissent que la force est l'attribut concomitant invariable, sinon l'attribut essentiel ou qualité première de la matière; ils affirment qu'à chaque masse primordiale constante appartient une quantité primordiale constante de force, et que toutes les transformations de la matière sont produites par une différenciation de cette force primordiale. Ceci suggère naturellement que toutes les variétés de l'existence physique étaient contenues en puissance dans la matière en général, ou matière *per se*, et en ont été tirées par un développement graduel.

En août 1874, le professeur Tyndall, alors président de l'Association Britannique, prononça au Congrès de l'association à Belfast, un discours inaugural où il fit la déclaration suivante :

« Mettant bas tout déguisement, voici l'aveu que je crois devoir faire devant vous : quand je jette un regard en arrière sur les limites de l'expérience expérimentale, je discerne au sein de cette matière, — que, dans notre ignorance et tout en proclamant notre respect pour son Créateur, nous avons jusqu'ici couverte d'opprobre, — la promesse et la puissance de toutes les formes et de toutes les qualités de la vie. »

Cette fière déclaration provoqua une émotion que sa portée

ne justifiait guère : car la solennité de l'aveu n'était pas tout à fait en rapport avec sa nouveauté. Les paroles de Tyndall n'étaient guère autre chose qu'une forme nouvelle donnée à une ancienne pensée de François Bacon, qui disait, il y a plus de deux siècles :

« Et l'on doit affirmer que la matière, quelle qu'elle soit, est munie, pourvue et formée de telle sorte que toute vertu, toute essence, tout acte et tout mouvement peuvent en être des conséquences ou des émanations naturelles ¹. »

La même chose a été répétée bien des fois depuis, par les évolutionistes métaphysiques, en termes analogues pour le fond à ceux de Schelling : « La matière est la semence générale de l'univers, où se trouve enveloppé tout ce qui se manifeste dans l'évolution ultérieure ². »

Néanmoins la formule de Tyndall reste mémorable et significative comme indiquant les changements que subit la théorie mécanique dans l'esprit des physiciens modernes.

Tyndall est un des plus vigoureux avocats de la théorie atomo-mécanique ; il prend constamment fait et cause pour ses traits dominants. Quand il parle de la matière, il entend un groupe défini d'atomes ou molécules distinctes et réelles, « Beaucoup de chimistes d'aujourd'hui », dit-il dans un autre discours — prononcé aussi devant l'Association britannique, à Liverpool, et republié par lui peu avant le Congrès de Belfast ³, — « refusent de parler des atomes et des molécules comme de choses réelles. Leur timidité les mène à s'arrêter au seuil de la théorie atomique, claire, ingénieuse, mécaniquement intelligible, énoncée par Dalton, — ou de toute autre forme de cette théorie, — et à faire de la doctrine des proportions multiples leur limite intellectuelle. Je respecte cette timidité, bien que je la trouve ici hors de propos. Les chimistes qui reculent devant ces notions d'atomes et de molécules, acceptent sans hésitation la théorie des ondes lumineuses. Comme

1. « Atque asserenda materia (qualiscumque ea sit) ita ornata et apparatus et formata, ut omnis virtus, essentia, actus atque motus naturalis ejus consecutio et emanatio esse possit. » Baco, *de Princ. atque Orig.*, Opp. ed. Bohn, vol. II, p. 694.

2. « Die Materie ist das allgemeine Samenkorn des Universums, worin Alles verhüllt ist, was in spaeteren Entwicklungen sich entaltet. » Schelling, *Ideen zu einer Philos. der Natur.*, 2^e éd., p. 315.

3. *Fragments of Science* (Amer. ed.), p. 358.

vous et moi, ils croient tous à un éther dont les vibrations produisent la lumière. Mettez encore une fois votre imagination en jeu, et figurez-vous une série de vibrations sonores passant dans l'air. Suivez-les en remontant à leur origine, et là, que trouvez-vous ? Un corps défini, tangible, en vibration. Ce peut être les cordes vocales d'un être humain, ce peut être un tuyau d'orgue ou une corde tendue. Suivez de la même manière une série de vibrations d'éther jusqu'à leur source ; vous souvenant en même temps que votre éther est une matière, dense, élastique et capable d'un mouvement soumis aux lois mécaniques et déterminé par elles. Que pensez-vous alors trouver comme source d'une série de vibrations d'éther ? Demandez à votre imagination si elle accepterait une proportion multiple vibrante, — une relation numérique — au lieu d'oscillation¹. Je ne le pense pas. Vous ne pouvez pas couronner l'édifice par cette abstraction. L'imagination scientifique, qui a ici une autorité, demande comme origine et comme cause d'une série de vibrations d'éther une parcelle de matière vibrante tout aussi définie, quoiqu'elle puisse être excessivement petite, que celle qui donne naissance à un son musical. Nous donnons à une telle parcelle le nom d'atome ou molécule. Je pense que l'esprit amené, au moment de chercher, à donner une définition nette, est sûr de réaliser cette image à la fin. »

Le sens clair de ces sentences, c'est qu'un atome ou molécule (éther ou matière) est juste dans la même relation avec son mouvement vibratoire qu'un corps ordinaire avec ses mouvements de translation, par exemple, dans la même relation qu'un corps stellaire ou planétaire, avec ses mouvements de rotation ou de révolution. Alors, de même que la conception du corps stellaire ou planétaire précède nécessairement la conception de son mouvement de rotation ou de révolution,

1. Quand Tyndall écrivait ceci, il avait probablement devant lui la leçon faite par W.-K. Clifford devant la *Royal Institution* en 1867, dans laquelle se présentait ce passage : « Pour expliquer les phénomènes de la lumière, il n'est nécessaire de supposer rien de plus qu'une oscillation périodique entre deux états à un point donné de l'espace. » (Clifford's, *Lectures and Essays*, vol. I, p. 85). Ou peut-être cette idée lui a-t-elle été suggérée par J. S. Mill qui, dans une note au chapitre XIV, livre III, de sa *Logique*, renvoyant à certaines observations du Dr Whewell, qualifie l'éther impondérable d'agent ondulatoire. »

de même aussi la conception de l'atome ou de la molécule précéderait nécessairement la conception du mouvement vibratoire dont la lumière, la chaleur, l'électricité, l'action chimique, etc., sont des modes connus ou supposés tels. En d'autres termes, pour rendre concevable l'existence de la matière, telle qu'elle se présente à notre action et à notre pensée, nous sommes contraints, d'après Tyndall, de supposer des particules matérielles ultimes, préexistant à ces mouvements ou manifestations de force, que nous saisissons sous forme de lumière, chaleur, électricité, action chimique, etc. Et ce qui est vrai du concept est vrai de la chose. La chose doit être, avant qu'elle puisse agir ou recevoir une action, d'après la vieille maxime : *Operari sequitur esse*¹.

Cette vue, présentée par Tyndall dans son discours de Liverpool, est la vieille notion synthétique du réalisme métaphysique. Les atomes ou molécules sont les substances existant antérieurement aux différents modes de mouvement qu'ils revêtent ensuite ou qui leur sont ajoutés comme accidents. Mais dans le discours de Belfast, cette vue est (inconsciemment sans doute) modifiée, de façon à se rapprocher du point de vue évolutionniste ou analytique. Il dit alors que la matière renferme ou implique à l'origine même les formes et qualités de la vie — qu'elle les contient, sinon en acte, du moins en puissance — de sorte qu'elles en procèdent par un développement spontané.

1. Il suffit d'un peu de réflexion pour voir que la réalisation, devant le regard de l'esprit qui cherche de Tyndall, d'atomes, ou molécules définies, susceptibles de mouvement, mais préexistant à ce mouvement, est pure illusion. Considérons pour un moment une particule ultime de matière dans son état d'existence avant tout mouvement. Elle est sans couleur, ni brillante ni obscure; car la couleur et le brillant sont simplement, d'après la théorie dont Tyndall est un champion distingué, des modes de mouvement. Elle est également sans température, — ni chaude ni froide, puisque la chaleur aussi est un mode de mouvement. Pour la même raison, elle n'a pas de propriétés électriques, magnétiques ni chimiques; bref, elle est dépourvue de toutes les qualités en vertu desquelles, sans parler de sa grandeur, elle pourrait être un objet appréciable aux sens, à moins que nous n'exceptons les propriétés de poids et d'étendue. Mais le poids n'est que l'exercice des forces attractives, et l'étendue aussi ne nous est connue que comme une résistance qui, à son tour, est une manifestation de force, une phase de mouvement. Ainsi la difficulté de saisir ces choses primordiales réside, non en leur extrême petitesse, mais leur privation totale de qualité. La réalité solide, tangible supposée par l'imagination scientifique de Tyndall n'est *• nec quid, nec quantum, nec quale* et s'évanouit complètement de l'esprit qui cherche, au moment où cet esprit s'efforce de la saisir séparé du mouvement qui, dit-il, la présuppose comme substratum nécessaire.

Ainsi toutes les tentatives pour construire les phénomènes physiques avec une synthèse d'éléments conceptuels personnifiés, — d'après la première vue ou vue synthétique, — sont vaines en physique aussi bien qu'en métaphysique; cela est devenu assez évident par les diverses considérations présentées. Que ces éléments soient *substance* et *accident* ou *matière* et *force*, ils n'en sont pas plus réels, et aucune réalité ne peut être produite par leur adjonction. Ce qu'on appelle évolution des choses ou des concepts inférieurs plus compréhensifs, dérivant des concepts supérieurs moins compréhensifs, — conformément au second point de vue, le point de vue analytique, — se trouve être également illusoire si l'on se reporte simplement à la nature de la formation des concepts. Les concepts supérieurs sont tirés des concepts inférieurs par l'omission ou le rejet des attributs différentiels; et, à coup sur, ce procédé logique ne comprend rien, dont on puisse légitimement inférer que les attributs rejetés sont contenus ou impliqués dans ceux que l'on conserve et dont l'ensemble forme le concept supérieur.

Il est inutile de dire, je crois, que ceci n'atteint nullement la validité des théories de l'évolution dans le domaine de l'existence physique réelle, appliquées aux formes organiques, et, dans une certaine mesure, aux formes inorganiques. Les questions de dérivation et descendance, de différenciation et distribution organiques et fonctionnelles, sont des questions de fait qui doivent être déterminées en harmonie avec les données de l'observation et de l'expérience. Les modes de l'existence peuvent s'engendrer les uns les autres, sans s'impliquer mutuellement, et sans qu'aucune forme de réalité physique puisse se déduire légitimement d'un concept. Cette parole d'Aristote, *ἐκ δὲ τῶν νοητῶν οὐδὲν γίνεται μέγεθος*, a un sens plus large que celui que lui assignent ses disciples scolastiques: les choses ne naissent pas des concepts. Et, comme on le verra plus clairement encore dans le chapitre suivant, la filiation des concepts n'est nullement identique avec la filiation des choses.

Les erreurs de l'évolutionisme — manifestes dans de nombreuses doctrines hylozoïstes et panthéistiques — sont plus éclatantes, il est vrai, dans ses formes ouvertement métaphysiques que dans ses formes matérialistes. Beaucoup de

grands systèmes métaphysiques ont pour caractère de s'élançer dans le vide, au-delà des limites de la généralisation légitime, pour saisir les *summa genera* qui servent de base à l'évolution. Ainsi Hegel tire toutes choses de l'Être pur, qui, — il le dit lui-même, — est complètement dépourvu d'attributs : pur fantôme logique évoqué par le rejet obligé des derniers attributs qui pourraient constituer le *summun genus* de toute classification de phénomènes¹. Ce fantôme, — Hegel le déclare encore expressément, — ne peut pas être distingué du pur Néant, et par conséquent il lui est identique. Aussi, quelques-uns des descendants intellectuels de Hegel — Dellingshausen, Rohmer, Werder, George et autres — ont-ils hardiment entrepris de déduire le monde phénoménal du prétendu concept de Néant ou Zéro. La même tentative a été faite par d'autres métaphysiciens, dans les systèmes desquels le *Non être* initial apparaît sous divers déguisements, — par exemple Schopenhauer et Hartmann, dont le principe germinal est une volonté impersonnelle, concept dont les attributs sont contradictoires, et qui est par conséquent aussi vide qu'un pseudo-concept de Néant. Les plus majestueux déguisements du néant substantiel, comme source de toute existence phénoménale, ce sont l'Absolu et la chose en soi ; l'un et l'autre excluent par définition toute relation possible, et par suite tout attribut possible, attendu que tout attribut est essentiellement une relation. Mais, quoique des concepts tels que ceux de *matière* et de *force* soient un peu moins creux que les pseudo-concepts des spéculations métaphysiques courantes, ils ne restent pas moins inféconds comme points de départ de l'évolution des réalités physiques concrètes.

Comme toutes les théories métaphysiques, la théorie mécanique, en identifiant des concepts avec des choses, a donné naissance à nombre de contradictions factices et de discussions

1. Strictement, la base de la « marche dialectique » de Hegel n'est pas même un fantôme de réalité. « L'Être par soi » est moins encore que le lieu d'un attribut disparu. La copule entre le sujet et le prédicat n'est rien de plus que l'expression formelle de ce fait que la relation de non-contradiction ou de coexistence subsiste entre deux attributs, ou entre un attribut et un groupe d'attributs. Ce n'est qu'une ligne abstraite (ou deux lignes) allant des éléments génériques aux éléments différentiels d'un concept. « L'être pur » n'est que le spectre de la copule entre un sujet disparu et un attribut isolé. C'est le signe de l'attribution qui « demeure inutile sur la scène » après que l'attribut et ce à quoi il est attribué, ont disparu l'un et l'autre.

sans fondement. Une des plus célèbres controverses de ce temps c'est le débat entre les champions de la théorie *corpculaire* de la matière, affirmant l'existence d'une chose réelle indépendante de la force, et les défenseurs de la théorie *dynamique*, qui soutiennent que les particules matérielles sont de purs centres ou sphères de force. La doctrine corpusculaire a pour elle la majorité des physiciens ainsi que l'opinion du vulgaire, tandis que la théorie dynamique, — produite d'abord par la spéculation métaphysique, — a été élevée ensuite sur des fondements prétendus non-métaphysiques, par Boscovitch, Ampère, Faraday, et beaucoup d'autres. L'opinion de Faraday est exprimée avec concision par Tyndall¹ : « Que savons-nous de l'atome, si ce n'est sa force ? Vous imaginez un noyau qui peut être appelé *a*, et vous l'entourez d'une force qu'on peut appeler *m* ; pour moi l'*a* ou le noyau s'évanouit, et la substance est constituée par la force *m*. En effet, quelle notion pouvons-nous concevoir du noyau indépendamment de ses forces ? Quelle idée reste-t-il, à laquelle nous puissions suspendre notre représentation d'un *a*, indépendant des forces connues ? »

Quand Faraday raisonnait ainsi, il ignorait sans doute qu'il ne faisait que reproduire de vieilles réflexions d'Aristote², qui depuis ont été fréquemment exprimées dans les écrits des penseurs modernes³. Le passage suivant peut être pris comme exemple :

« C'est une pure illusion de l'imagination qu'il reste quelque chose, on ne sait quoi, après que nous avons dépouillé un objet de tous les prédicats qui lui appartiennent⁴. »

La difficulté ainsi présentée est tout à fait sans fondement. La matière ne peut pas plus être réalisée ou conçue comme pure présence passive, spatiale, que comme un ensemble de forces. La force n'est rien sans la masse, et la

1. *Faraday as a discoverer*, Amer. ed., p. 123. Pour l'expression de cette vue par Faraday lui-même, voyez sa *Speculation touching Electric Conduction and the Nature of Matter*, Phil. Mag., ser. III, vol. XXIV, p. 136.

2. De Gen. et Corr., II, 1, 3, 4, 6; Met., III, 5; IV, 2; VI, 1.

3. Cf. i. a. Locke, *Essay on Human Understanding*, livre, II, ch. xxiii et xxiv.

4. « Es ist eine blosser Täuschung der Einbildungskraft, dass, nachdem man einem Object die einzigen Prädikate die es hat, hinweggenommen hat, noch Etwas, man weiss nicht was, von ihm zurueckbleibe. » Schelling, *Ideen*, etc., p. 18.

masse n'est rien sans la force. De même que le métaphysicien ne peut pas concevoir la « chose » ou la substance indépendamment de ses propriétés, ni, réciproquement, les propriétés indépendamment de la substance, de même le physicien ne peut pas saisir la matière (c'est-à-dire la masse) sans la force, ni la force sans la matière. La masse, l'inertie, ou la matière, *en soi*, est indiscernable du néant absolu ; car la masse ne révèle sa présence et n'affirme sa réalité que par son action, sa force, contre-balancée ou non, sa tension ou son mouvement ; si nous réduisons la masse sur laquelle agit une force donnée, si petite qu'elle soit, à sa limite zéro — ou, en termes mathématiques, à l'infiniment petit, — la conséquence est que la vitesse du mouvement produit est infiniment grande, et que la « chose » (si dans ce cas nous pouvons parler d'une chose) est à un moment quelconque, non pas ici ni là, mais partout — qu'il n'y a pas de présence réelle. Il est donc impossible de construire la matière par une synthèse de forces. Et il est incorrect de dire avec Bain¹ que « matière, force, et inertie sont au fond trois noms pour désigner le même fait » ou que « force et matière ne sont pas deux choses, mais une chose, » ou² que « force, inertie, moment, matière ne sont qu'un seul fait » ; la vérité est que la force et l'inertie sont des intégrants conceptuels de la matière, et que ni l'une ni l'autre ne sont à proprement parler des faits.

L'erreur radicale de la théorie corpusculaire aussi bien que de la théorie dynamique consiste en cette illusion que les éléments conceptuels de la matière peuvent être saisis comme entités séparées et réelles. La théorie corpusculaire prend l'élément d'*inertie*, et le traite comme réel par lui-même, tandis que Boscovitch, Faraday et tous ceux qui définissent les atomes ou molécules comme des « centres de force » cherchent à réaliser l'élément correspondant, la *force*, comme une entité par elle-même. Dans les deux cas des produits de l'abstraction sont pris à tort pour des espèces de réalités.

Un examen satisfaisant des termes conceptuels *inertie* et *force*, et de leur vrai contenu, est impossible ici sans anticiper sur les considérations qui appartiennent régulièrement

1. *Logic*, vol. II, p. 225.

2. *Ibid.*, p. 389.

aux chapitres suivants. La corrélation essentielle de l'inertie avec la force est acquise par les plus anciennes définitions. Newton parle expressément de l'inertie comme d'une force. « Il y a, dit-il¹, une force inhérente à la matière, un pouvoir de résistance en vertu duquel tout corps, autant qu'il est en lui, persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme rectiligne. » Depuis Newton, cette façon de s'exprimer a été bannie de la définition. Young² définit l'inertie « l'impuissance où est la matière d'altérer l'état dans lequel elle est mise par une force extérieure quelconque, que cet état soit le repos ou le mouvement »; et de même Whewell³: « la quantité de *matière* considérée comme résistant à la communication du mouvement ». Toutes ces définitions impliquent cependant que les forces qui meuvent un corps ou une particule prise comme un tout, sont strictement et absolument des forces extérieures. Dans le langage de Newton⁴ la force est « *impreste* sur un corps, et exercée sur lui pour changer son état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite. »

Il n'est pas difficile de comprendre comment la disjonction de la matière et de la force et le sens étymologique du mot « inertie » ont conduit à supposer que la matière est essentiellement passive, ou, comme on le dit communément, morte. Si on considère un corps en lui-même — en le détachant par la pensée des relations qui donnent naissance à ses attributs — il est en effet inerte, et toute son action vient du dehors. Mais cette existence isolée d'un corps est une pure fiction de l'entendement. Les corps n'existent qu'en vertu de leurs relations; leur réalité réside en leur action mutuelle. La matière inerte, au sens de la théorie mécanique, est aussi inconnue à l'expérience qu'elle est inconcevable à la pensée. Toute particule de matière dont nous avons une connaissance quelconque attire toutes les autres particules conformément aux lois de la gravitation; et tout élément matériel exerce des actions chimique, électrique et autres sur les autres éléments qui, à l'égard de ces actions, lui sont corrélatifs. Un corps, il est vrai, ne peut se mouvoir lui-même; mais cela tient à la

1. *Princ.*, Def. III.

2. *Mechanics*, p. 117

3. *Mechanics*, p. 243.

4. *Princ.*, Def. IV.

même raison qui ne lui permet pas d'exister en lui-même et par lui-même. La présence même d'un corps dans l'espace et le temps implique, aussi bien que son mouvement, une action mutuelle avec les autres corps, et par suite *actio in distans*. Par conséquent, toutes les tentatives pour réduire la gravitation ou l'action chimique au choc pur et simple, sont sans but et absurdes.

Les physiiciens savent parfaitement que le sens communément attaché au mot *inertie* ne s'applique pas à la matière. « L'impossibilité où sont tous les points matériels, dit M. Poisson, de se mettre en mouvement ou de changer le mouvement qui leur a été communiqué, sans le secours d'une force, est ce qu'on entend par l'*inertie* de la matière. Ce mot ne signifie pas que la matière soit incapable d'agir; car, au contraire, chaque point matériel trouve toujours dans l'action d'autres points matériels, mais jamais en lui-même, le principe de son mouvement ¹. »

En dépit de propositions comme celle-ci, et quoique les princes de la physique comprennent clairement le vrai sens de la doctrine de l'inertie, le fantôme de la « matière morte » continue à s'imposer constamment comme base des spéculations cosmologiques. Ainsi, le professeur Philippe Spiller, auteur d'un fort utile manuel de physique, écrivain fécond en matière de science, publia il y a quelques années un traité de cosmologie ² dont les théorèmes sont fondés sur cette proposition expresse « qu'aucun élément constitutif d'un corps, aucun atome, n'est en lui-même originairement doué de force, mais qu'un tel atome est absolument mort et sans aucun pouvoir inhérent d'agir à distance ³. » Le contenu de ce traité montre qu'il ne refuse pas seulement la force aux atomes pris un à un, mais qu'il nie la possibilité de leur action mutuelle. Il est donc conduit à affirmer la substantialité indépendante de la force; et par suite il suppose que la force est une présence *quasi* matérielle remplissant tout l'espace, ou, comme il le dit lui-même, une matière incorporelle (*unkörperlicher Stoff*). Au mépris complet de la corrélation fondamentale de la force et de la masse, Spiller identifie sa force-substance avec cet

1. Poisson, *Traité de mécanique*, liv. II, chap. 1, p. 110.

2. *Der Weltaether als kosmische Kraft*. Berlin, Deuicke's Verlag, 1873.

3. *Loc. cit.*, p. 4.

éther qui sert à tout, de sorte que ce demi-concept personnifié qui, dans l'opinion de tous les autres physiciens, n'est pas seulement impondérable, mais dépourvu de cohésion, de forces chimiques, caloriques, électriques et magnétiques — et qui, en effet, *doit* en être dépourvu pour jouer le rôle de substratum de ces divers modes de mouvement, — qui est, par suite, encore plus « mort », si possible, que la matière ordinaire, cet éther, dis-je, sans changer de nom, sans cesser d'être le substratum des ondes lumineuses et autres, devient tout-à-coup, la quintessence même de toute énergie possible.

Les spéculations du professeur Spiller sont une étrange résurrection des rêves bien connus de Képler : il avait imaginé que les planètes étaient soutenues et transportées dans leur cours par une « espèce immatérielle » (*species immateriata*) capable de surmonter l'inertie des corps¹. L'« espèce immatérielle » de Képler est la même absurdité que la « matière incorporelle » de Spiller ; la seule différence est que la chimère de Képler était d'une absurdité moins éclatante à l'aurore confuse des notions mécaniques, que le concept extravagant de Spiller au milieu de tout l'éclat scientifique de notre temps.

Quel rôle la matière morte de Spiller pourrait-elle jouer dans un schème cosmologique ? il est difficile de le dire. Quand même on pourrait concevoir l'action d'une force sur des particules immuables dépourvues de pesanteur et de toute autre force, ces particules devraient également subir de tous côtés l'action de l'éther omniprésent ; elles ne pourraient donc, en aucune façon, aider à établir les différences de densité ou autres qui ne sont pas contenues dans l'éther lui-même et ne peuvent en être tirées. Elles ne pourraient pas même expliquer l'étendue d'un corps, bien moins encore sa dureté, étant complètement étrangères à la force de résistance. Mais passons cela, et accordons que l'étendue sans résistance est possible ; ces particules hypothétiques ne seraient que des bulles d'espace vide prises dans

1. • Relinquitur igitur, ut quemadmodum lux omnia terrena illustrans species est immateriata ignis illius, qui est in corpore solis, ita virtus hac, planetarum corpora complexa et vehens, sit species immateriata ejus virtutis, quæ in ipso sole residet, inastimabilis vigoris, adeoque actus primus omnis motus mundani, etc. Képler, *De Motibus stellæ Martis*, pars tertia, cap. xxxiii ; Kepleri Opp., ed Frisch, vol. III, p. 302.

l'éther universel, et tous les phénomènes du monde matériel ne seraient dus qu'à la différenciation de cet éther.

Les erreurs qui ont prévalu au sujet de l'inertie de la matière ont naturellement conduit à des illusions correspondantes sur la nature de la force. Ici nous rencontrons, *in limine*, une ambiguïté dans le sens du mot force, en physique et en mécanique. Quand nous parlons d'une « force de la nature », nous prenons le mot force dans un sens très différent de celui qu'il a en mécanique. Une « force de la nature » est un reste de la spéculation ontologique ; en langage ordinaire, ces mots désignent une entité distincte et réelle. Mais, comme fonction mécanique déterminée, la force n'est que la valeur du changement du moment, — en termes mathématiques, la différentielle du moment à un instant donné. « Le moment, dit M. Tait¹, est le temps intégral de la force, parce que la force est la valeur du changement du moment. » Dans les livres de physique qui font loi, la force est définie la cause du mouvement. « Toute cause, dit Whewell², qui meut ou tend à mouvoir un corps, ou qui change ou tend à changer son mouvement, s'appelle force. » De même Clerk Maxwell³ : « La force est tout ce qui change ou tend à changer le mouvement d'un corps en modifiant sa direction ou sa quantité. » La définition de Somoff pénètre bien plus profondément dans la nature de la force, quoique le mot « cause » soit conservé : « Un point matériel est mû par la présence d'une matière en dehors de lui. Cette action de la matière extérieure est attribuée à une cause qu'on appelle force⁴. » Si l'on prend ces définitions pour l'expression correcte des théories reçues dans les sciences physiques, il est évident, — en dépit des considérations que j'ai présentées dans ce chapitre et dans les précédents, — que la force n'est point une chose ou une entité individuelle qui se présente directement à l'observation ou à la pensée. En tant qu'elle est traitée comme un terme défini et un dans les opérations de la pensée, la force n'est qu'une circonstance dans la conception de la dépendance mutuelle des masses en mouvement. La cause du mouvement ou du changement de mou-

1. *On some recent advance in Physical Science*, 2^e éd., p. 347.

2. *Mechanics*, p. 1.

3. *Theory of heat*, p. 83.

4. Somoff, *Theoretische Mechanik* (trad. angl. par Ziwelt), vol. II, p. 155.

vement dans un corps est la condition ou le groupe de conditions dont le mouvement dépend; cette condition ou ce groupe de conditions est toujours un mouvement ou un changement de mouvement, des corps extérieurs relativement au corps considéré dont ils sont les corrélatifs dynamiques¹. En d'autres termes, la force est une pure inférence tirée du mouvement lui-même sous les conditions universelles de la réalité; sa mesure et sa détermination résident seulement dans l'effet qui la réclame comme cause; elle n'a pas d'autre existence. La seule réalité de la force et de son action est la correspondance entre les phénomènes physiques conformément au principe de la relativité essentielle de toutes les formes de l'existence physique.

La force n'est donc pas une réalité indépendante: cela est si simple et si évident que quelques penseurs ont proposé de bannir absolument le terme *force*, aussi bien que le terme *cause*. Sans doute on doit être avare de termes semblables (la clarté de quelques traités modernes de mécanique en est un exemple²), mais en pratique il est impossible de s'en dispenser tout à fait, parce que l'élément conceptuel *force*, dûment interprété dans les termes de l'expérience, fait légitimement partie de la conception de l'action physique, et si le nom en était banni, il réapparaîtrait immédiatement sous un autre mot. Il y a peu de concepts qui n'aient pas, dans la science comme dans la métaphysique, produit parfois une confusion semblable à celle qui règne au sujet de la « force » et de la « cause », et le coup porté à ceux-ci détruirait toute espèce de concept. Néanmoins, il est de la plus grande importance, dans toutes les spéculations concernant la dépendance mutuelle des phénomènes physiques, de ne jamais perdre de vue que la *force* est un terme purement conceptuel, et non une chose distincte, tangible ni intangible.

On voit, par l'examen le plus sommaire des traités élémentaires de physique, aussi bien que des ouvrages scientifiques originaux, combien tout cela est imparfaitement compris de notre temps. On parle constamment de la relation de la force

1. « Der gegenwärtig klar entwickelte mechanische Begriff der Kraft », dit Zoellner (*Natur der Kometen*, p. 323). « enthält nichts Anders als den Ausdruck einer räumlichen und zeitlichen Beziehung zweier Körper. »

2. Cf. Kirchhoff, *Vorlesungen ueber mathematische Physik*. Heidelberg, 1876

avec le mouvement mécanique comme d'un « fait assuré par l'observation et vérifié par l'expérimentation ». Dans un article publié en juillet 1872, il est dit : « Pour la première question (*Qu'est-ce qui produit le mouvement ?*) il n'y a pas diversité d'opinion. Tout le monde s'accorde à dire que ce qui produit le changement ou cause le mouvement, c'est la *force*¹. » Le sens évident de ce passage, c'est qu'on pourrait se demander si le changement ou mouvement matériel est produit par la force, ou bien par quelque autre chose, et que les physiciens sont arrivés enfin à conclure qu'il est produit par la force. Une telle question mérite, en effet, d'être gravement méditée! C'est comme la question que M. Sachs, dans son désespoir, proposait au monde : « Qui assurera que la planète regardée par les astronomes comme Uranus est bien réellement Uranus²? »

A un autre point de vue, les physiciens tombent généralement dans une confusion plus grande encore sur la nature de la force. On dit que les corps sont *doués* d'une quantité définie de force; c'est supposer que chaque corps ou atome particulier possède, inhérente à lui, une quantité invariable d'énergie. Cette proposition, outre qu'elle enveloppe l'idée discutée à l'instant, de l'existence propre de la force, implique l'hypothèse que la force peut être comme telle un attribut ou un concomitant d'une particule simple. C'est négliger ce fait, d'ailleurs bien connu des physiciens, que la conception même de la force, suppose une relation entre deux termes au moins. « La force, dit Clerk Maxwell³, n'est qu'un aspect de cette action mutuelle entre deux corps, appelée par Newton *Action* et *Réaction*, et qui est maintenant plus brièvement exprimée par le simple mot *Effort* (Stress) ». Et dans un autre passage⁴ : « Si nous considérons le phénomène total de l'action entre deux portions de matière, nous l'appelons *Effort*... Mais si nous restreignons notre attention à l'une de ces deux portions de matière, nous ne

1. *What determines molecular motion*, etc. By James Croll. Phil. Mag., 4^e série, vol. XL, p. 37.

2. *Das Sonnensystem, oder neue Theorie vom Bau der Welten*, von S. Sachs, p. 193 (cité par Fechner).

3. *Matter and Motion*, CI.

4. *Ibid.*, XXXVI, XXXVIII.

voyons, pour ainsi dire, qu'un seul côté du phénomène — celui qui affecte la portion de matière considérée. — Nous appelons alors cet aspect du phénomène, eu égard à son effet, une *Force Extérieure* agissant sur cette portion de matière, et, en pensant à sa cause, nous l'appelons l'*Action* de l'autre portion de matière. L'aspect opposé de l'effort s'appelle *Réaction* sur l'autre portion de matière. » Cette proposition de Rankine¹ a le même sens : « La force est une action entre deux corps causant ou tendant à causer un changement dans leur repos ou dans leur mouvement relatifs. » Il suit de là qu'une « force centrale constante », appartenant à un atome ou à une molécule individuelle, en elle-même et par elle-même, — est une impossibilité.

1. *Applied Mechanics*, 4^e éd., p. 15.

CHAPITRE XI

CARACTÈRE ET ORIGINE DE LA THÉORIE MÉCANIQUE (SUITE).

ELLE EST UN EXEMPLE DE LA TROISIÈME ERREUR RADICALE DE LA MÉTAPHYSIQUE

Il n'est guère de croyance regardée généralement comme plus certaine que la foi dans la solidité absolue de la matière. Sauf Descartes et ses successeurs immédiats, — dont l'assertion que la matière n'est autre chose que l'étendue n'est évidemment pas défendable, — toujours philosophes et physiciens également ont placé la solidité et l'impénétrabilité au premier rang de ses qualités premières. Cette croyance, — eu égard aux transformations observées dans les choses matérielles, — conduit inévitablement à supposer que la matière consiste en particules indivisibles, absolument rigides. L'opinion exprimée par Tyndall, dans le passage du discours de Liverpool cité au chapitre précédent, est l'opinion de la plupart des hommes de science, aussi bien que des personnes dépourvues de culture scientifique. Tous, comme Tyndall, trouvent absurde de nier que le concept de matière implique nécessairement la notion de solidité définie, tangible, indestructible. C'est une supposition tacite et générale, que des trois états moléculaires, ou états d'agrégation, sous lesquels la matière se présente aux sens — l'état solide, l'état liquide, l'état gazeux — les deux derniers ne sont que des déguisements ou des complications du premier ; qu'un gaz, par exemple, est en fait un groupe, un amas de solides, comme un nuage de poussière, qu'il ne diffère d'un tel nuage que par une plus grande

régularité des formes et des distances des particules dont il est composé, et par ce fait que, dans le gaz, les particules sont simplement sous l'empire de leurs attractions et répulsions mutuelles, tandis que, dans le nuage de poussière, elles obéissent à des forces extrinsèques. Le passage de l'un des trois états moléculaires à l'autre se fait dans un ordre régulier, invariable, trop évident pour pouvoir être ignorée ; mais on suppose que l'état solide constitue l'état primaire, dont l'état liquide et l'état gazeux ne seraient que de simples dérivés ; et on admet en outre que, si ces trois états forment une évolution, cette évolution marche de l'état solide à l'état de vapeur ou de gaz. De cette manière la forme solide de la matière n'est pas seulement la base et l'origine de toutes ses déterminations ultérieures, — de toutes ses évolutions ou changements — mais elle est aussi l'élément vrai, le type de sa représentation et de sa conception par l'esprit.

Quoique cette façon de concevoir le rapport entre les états moléculaires de la matière soit universellement admise, il n'est pas difficile de montrer qu'elle n'est pas d'accord avec les faits. Toute évolution procède de ce qui est relativement indéterminé à ce qui est relativement déterminé, de ce qui est comparativement simple à ce qui est comparativement complexe. Bornons, pour un moment, notre attention aux deux termes extrêmes de l'évolution, le solide et le gaz, et omettons l'état liquide intermédiaire : une comparaison de l'état gazeux avec l'état solide de la matière montre, à première vue, que le premier n'est pas la fin, mais le commencement de l'évolution. Non seulement le gaz est comparativement indéterminé — sans fixité de volume, sans structure cristalline ou autre — mais encore il montre, dans ses manifestations fonctionnelles, cette simplicité et cette régularité caractéristiques de tout type ou forme primaire. Examinons d'abord le côté purement physique d'un gaz, — je ne parle, d'ailleurs, que des gaz qui sont à peu près parfaits, à l'exclusion des vapeurs à basse température et des gaz faciles à liquéfier. — Son volume s'étend ou se contracte avec la pression à laquelle il est soumis ; sa vitesse de diffusion est inversement proportionnelle à la racine carrée de sa densité ; son coefficient de dilatation est uniforme pour un accroissement égal de température ; sa chaleur spécifique est la même à

toutes les températures, et, dans un poids donné, pour toutes les densités et sous toutes les pressions ; les chaleurs spécifiques de volumes égaux de gaz simples et non liquéfiables, aussi bien que de gaz composés formés sans condensation, sont les mêmes pour tous les gaz de quelque nature qu'ils soient, et ainsi de suite. Sous tous ces rapports, très grand est le contraste avec la forme liquide et solide, dont les relations de volume, de structure, ou de l'un et de l'autre à la fois, avec la température, la pression mécanique ou toute autre force, sont compliquées à l'extrême. Mais ce contraste devient encore plus éclatant au point de vue chimique. Il est impossible d'assigner une proportion de volume aux combinaisons des solides et des liquides — en fait la combinaison immédiate des solides entre eux est impossible, — et les nombres qui expriment les proportions en poids manifestent une absence de relations et de régularité, que les efforts persévérants des hommes de science (tels que Dumas, Stas, H. Carey Lea, Cooke, L. Meyer, Mendelejeff, Baumhauer) n'ont pu atténuer. Dans la combinaison des gaz, au contraire, règnent l'ordre et la simplicité. « Le rapport des volumes dans lesquels les gaz se combinent est toujours simple, et le volume du produit gazeux est toujours dans un rapport simple avec les volumes de ses éléments », — telle est la loi de Gay-Lussac. En poids, l'hydrogène et le chlore se combinent dans le rapport de 1 à 35,5 ; en volumes, un volume d'hydrogène se combine avec un volume de chlore (les volumes étant pris d'ailleurs à la même pression et à la même température) pour former deux volumes d'acide chlorhydrique. L'oxygène et l'hydrogène se combinent dans le rapport de 16 à 2 en poids ; mais un volume d'oxygène se combine avec deux volumes d'hydrogène pour former deux volumes de vapeur d'eau. L'azote et l'hydrogène, — dont ce qu'on appelle les poids atomiques sont 14 et 1, — se combinent dans le rapport simple d'un volume d'azote à trois volumes d'hydrogène, pour former deux volumes de gaz amoniac. Le carbone — dont le « poids atomique » est 12, — quoiqu'on ne puisse, en fait, l'obtenir sous la forme gazeuse, est supposé par les chimistes (pour des raisons qu'il n'est pas nécessaire de formuler ici), se combiner avec l'hydrogène, dans le rapport d'un volume à quatre, pour donner deux volumes de gaz des marais.

Tout ceci permet de conclure que s'il y a un état typique et primaire de la matière, ce n'est pas l'état solide, mais l'état gazeux. L'hypothèse admise, il en résulte que l'évolution moléculaire de la matière se conforme à la loi de toute évolution en procédant de l'indéterminé au déterminé, du simple au composé, de la forme gazeuse à la forme solide. Donc, si l'explication d'un phénomène doit nous montrer sa genèse à partir de son commencement le plus simple, de ses formes les plus primitives, c'est la forme gazeuse, qui fournit une base pour l'explication de la forme solide, et non pas du tout le solide qui peut servir à expliquer le gaz.

D'après les considérations précédentes, j'ai le droit d'affirmer que la vraie relation entre les états moléculaires de la matière est exactement l'inverse de celle que l'on suppose universellement. L'universalité de cette supposition indique cependant qu'elle est due, non à une erreur fortuite de raisonnement, mais à quelque pente naturelle de l'esprit. La question suivante se pose donc : quelle est l'origine de cette illusion régnante sur la constitution de la matière ? Je crois que la réponse est extrêmement simple, et que son importante est égale à sa simplicité. Une des erreurs auxquelles l'esprit humain est exposé par suite des lois de son développement, — j'appelle les erreurs de ce genre erreurs *structurales*, — c'est que l'esprit tend à confondre l'ordre de genèse de ses idées sur les objets matériels avec l'ordre de genèse de ces objets eux-mêmes. J'ai montré jusqu'ici que le progrès de notre connaissance repose sur l'analogie — sur une réduction de l'*Etrange* et de l'*Inconnu* aux termes du *Familier* et du *Comm.* — En un certain sens, il est vrai, comme on l'a dit souvent, toute connaissance est reconnaissance. « L'homme établit constamment des comparaisons, dit Pott ¹, entre le nouveau qui se présente à lui et l'ancien qu'il connaît déjà. » Le développement du langage montre qu'il en est ainsi. Le grand agent de l'évolution du langage est la métaphore le passage d'un mot, de son sens ordinaire et reçu, à un autre analogue. Ce transport du nom désignant une chose connue et familière à une chose inconnue et inaccoutumée est le type de l'opération que fait l'esprit toutes les fois qu'il aborde

1. *Etymologische Forschungen*, 2^e ed., vol. II, p. 139.

des phénomènes nouveaux et étranges. Il assimile ces phénomènes aux phénomènes connus ; il identifie, autant que possible, l'Etrange avec le Familier ; il réduit ce qui est extraordinaire et rare aux termes de ce qui est ordinaire et commun. Ce qui se présente d'abord aux sens est en même temps le fait le plus ancien et le plus persistant dans la conscience, et reste ainsi fixé comme étant le plus familier. Or la forme de la matière qui nous frappe le plus est la forme solide : aussi cette forme est-elle connue la première dans l'enfance de l'esprit humain, et sert-elle plus tard de base pour reconnaître les autres formes.

Voilà pourquoi, dans les temps reculés de l'histoire scientifique, le solide seul est considéré comme matériel. Il se passa bien du temps avant que l'air atmosphérique lui-même, — si vivement manifesté sous la forme de vent et de tempête, — fût admis comme une forme de la matière. Encore aujourd'hui, les mots signifiant vent ou souffle — *animus, spiritus, Geist, ghost*, etc. — sont les termes qui désignent l'opposé fondamental de la matière, même dans les langues des nations civilisées. On peut douter que les philosophes anciens ou les alchimistes du moyen-âge aient conçu distinctement comme matérielle aucune substance aériforme, autre que l'air atmosphérique. — Il est certain que, jusqu'au temps de Van Helmont, dans la dernière partie du xvi^e siècle et les premières décades du xvii^e, la matière aériforme ne fut pas l'objet d'une recherche scientifique suivie.

Voilà pourquoi, tandis que, dans la nature, l'évolution se développe de l'état aériforme à l'état solide de la matière, l'évolution de la connaissance dans l'esprit des hommes s'est faite, au contraire, de l'état solide à l'état aériforme ; par suite, l'état aériforme ou gazeux en vint à être considéré comme une simple modification de l'état solide. Pour les mêmes raisons, la première forme d'action matérielle comprise par l'intelligence naissante de l'homme, ce fut l'action entre solides — l'action mécanique ; — par suite la différence entre le solide et le gaz fut considérée comme une simple différence de distance entre des particules solides, différence produite par un mouvement mécanique.

De plus, dans l'esprit des hommes ordinaires, la familiarité est universellement confondue avec la simplicité. Comme l'ex-

plication d'un phénomène tend toujours à montrer sa genèse depuis son commencement le plus simple, l'esprit, dans ses tentatives pour expliquer la forme gazeuse, suit naturellement la marche tracée par l'évolution de ses idées sur la matière — de son concept de matière. — Il arrive ainsi jusqu'à la forme la plus ancienne, la plus familière, — et par là même, en apparence, la plus simple, — sous laquelle la matière ait été et reste saisie par lui ; il suppose ainsi que la particule solide, l'atome, est le fait ultime, l'élément premier de toute représentation et de toute conception d'existence matérielle.

L'identité supposée de l'ordre de la conception avec l'ordre de la réalité (la troisième des suppositions trompeuses énumérées au chapitre ix) est une des plus fatales erreurs de la spéculation ontologique. J. Stuart Mill l'a signalée, mais il n'a pas réussi à découvrir la vraie source de cette erreur telle qu'on l'a montrée plus haut ; selon son habitude, il attribue l'ordre et la connexion de nos idées à une association purement fortuite. « Une grande partie des erreurs qui existent dans le monde, dit-il¹, procède de cette supposition tacite que l'ordre qui règne entre nos idées des objets de la nature, doit régner également entre ces objets. » De nombreux exemples pourraient montrer combien cette supposition est invétérée et combien sa domination est irrésistible dans la spéculation ontologique. Spinoza déclare en propres termes que « l'ordre et la connexion des idées sont les mêmes que l'ordre et la connexion des choses² ». Dans un récent traité de logique, on lit même que « l'enchaînement logique des idées correspond à l'enchaînement réel des choses³ ». Ici donc encore le caractère métaphysique de la théorie atomo-mécanique devient manifeste.

Cette opinion — que la solidité et l'imperméabilité sont des attributs non seulement indispensables, mais aussi parfaitement simples de la matière, — n'est rien moins qu'universelle.

1. *Logic*, 8^e ed., p. 521.

2. « Ordo et connexio idéarum idem est ac ordo et connexio rerum ». *Eth.* II, prop. 7.

3. Delbœuf, *Logique*, p. 91.

Cependant quelques penseurs ont bien vu qu'elle est due à un préjugé. « Dans l'hypothèse, dit M. Cournot¹, à laquelle les physiciens modernes sont conduits, — celle d'atomes maintenus à distance les uns des autres, et même et à des distances qui (bien qu'inappréciables par aucune expérience), sont pourtant très grandes par comparaison avec les dimensions des atomes ou des corpuscules élémentaires, — rien n'oblige à concevoir ces atomes comme de petits corps durs ou solides, plutôt que comme de petites masses molles, flexibles ou liquides. La préférence que nous donnons à la dureté sur la mollesse, le penchant que nous avons à imaginer l'atome ou la molécule primordiale comme une miniature de corps solide plutôt que comme une masse fluide du même ordre de petitesse, ne sont donc que des préjugés d'éducation qui tiennent à nos habitudes et aux conditions de notre vie animale. En conséquence, rien de moins fondé que la vieille créance, si enracinée chez les anciens scolastiques, et perpétuée jusque dans l'enseignement moderne, qui fait de l'*impénétrabilité*, ajoutée à l'*étendue*, le caractère essentiel, la propriété fondamentale de la matière et des corps. Il est trop clair que des atomes qui ne pourraient jamais arriver au contact, pourraient encore moins se pénétrer : de sorte que la prétendue qualité fondamentale serait, au contraire, une qualité inutile, oiseuse, qui ne pourrait jamais entrer en action, qui n'interviendrait dans l'explication d'aucun phénomène, et que nous affirmerions gratuitement. Il en faut dire autant de l'*étendue*, en tant qu'attribut ou qualité des atomes, puisqu'en dernière analyse, et dans l'état présent des sciences, toutes les explications qu'on a pu donner des phénomènes physico-chimiques restent parfaitement indépendantes des hypothèses qu'on pourrait faire sur les figures et les dimensions des atomes ou des molécules élémentaires. Quant aux corps de dimensions finies, qui tombent sous nos sens, tous sont certainement pénétrables ; et la continuité des formes de l'*étendue*, en ce qui les concerne, n'est qu'une illusion.

» Dans les corps qui tombent sous nos sens, la solidité et la rigidité, comme la flexibilité, la mollesse ou la fluidité, sont autant de phénomènes très complexes, que nous tâchons d'ex-

1. *De l'Enchaînement*, etc., vol. I, p. 246, seq.

plier de notre mieux, à l'aide d'hypothèses sur la loi des forces qui maintiennent les molécules élémentaires à distance, et sur l'étendue de leur sphère d'activité, comparée au nombre de molécules comprises dans cette sphère et aux distances qui les séparent. Or, — tandis que la notion familière des corps à l'état solide est ce qui nous a suggéré la conception du corpuscule rigide ou de l'atome élémentaire, comme principe d'explication philosophique et scientifique, — ce qu'il y a de plus difficile à expliquer d'une manière satisfaisante, au moyen de la conception des atomes, c'est précisément la constitution des corps à l'état solide. »

J'ai déjà cité, au chapitre VII, un passage, analogue pour le sens, des leçons de M. Cauchy. Ce mathématicien distingué discute la nécessité d'attribuer à la matière, comme qualité primaire, soit l'impénétrabilité, soit l'étendue (sans lesquelles, ou sans l'une ou l'autre desquelles, il ne pourrait pas y avoir, d'ailleurs, de solidité).

La solidité, dans le sens où on l'attribue à l'atome, n'est pas un fait, mais la réalisation d'une abstraction. Comme l'observe M. Cournot, un corps absolument solide est inconnu à l'expérience. La résistance des corps qui se présentent au physicien dépend de la prépondérance ou de l'équilibre de forces telles que la cohésion, la cristallisation et la chaleur ; l'hypothèse de la solidité absolue de la matière résulte de cette perception superficielle et imparfaite des données des sens qui se retrouve dans toutes les notions primitives de l'esprit humain, — en y joignant l'oubli du caractère essentiellement relatif de toutes les propriétés des choses, caractère qui sera étudié plus au long dans la suite.

La même perception primitive, sommaire et incomplète des données des sens, a fait naître cette autre hypothèse que toute action physique est due au choc. La seule action mutuelle entre des corps qui soit directement appréciable par la vue et le toucher, c'est le changement par collision dans leur état de repos ou de mouvement. Le choc est donc la plus ancienne et la plus familière de toutes les actions observables d'un corps sur un autre. Quand le choc se produit entre deux solides se mouvant avec des vitesses différentes, ou (ce qui est la même chose) entre un solide en mouvement et un autre solide en repos, l'observateur ordinaire ne voit rien de plus

que le déplacement d'un corps par l'autre et le transport direct de mouvement. Ce déplacement et ce transport sont supposés immédiats, et les corps sont supposés absolument rigides. Mais cette observation du fait est aussi grossière que l'interprétation en est inexacte. Une étude plus attentive des phénomènes montre qu'il n'y a aucun déplacement immédiat ; qu'il n'y a pas de transport direct de mouvement ; que les corps ne sont pas absolument rigides ; que le choc des solides, simple en apparence, forme toute une série très complexe de circonstances, comprenant non seulement l'action et la réaction directe, mais aussi la compression et l'expansion alternatives, la tension et la détente des liens de cohésion et de cristallisation, la transformation des mouvements rectilignes en mouvements vibratoires, des mouvements de translation en mouvements moléculaires, le déploiement et l'absorption de l'énergie : bref, des changements, momentanés sinon durables, de toutes ou presque toutes les propriétés des corps entre lesquels le choc se produit. En présence de tout ceci, que demande la théorie atomo-mécanique, en parlant de n'admettre entre les corps d'autre action mutuelle que le choc ? Elle demande que les premières impressions rudimentaires et non raisonnées du sauvage sans culture soient à jamais la base de toute science possible.

Supposez Hobbes connaissant les circonstances de l'origine et de la transformation du mouvement, telles qu'elles ont été mises en lumière, ces temps derniers, par l'expérience et l'expérimentation ; supposez-le capable d'indiquer, aussi clairement que le feraient Helmholtz et Mayer, ou Thomson et Joule, non seulement les mouvements de rotation et de révolution de notre planète, mais aussi les moindres perturbations qu'un coup porté par une main humaine, un choc causé par la chute d'une masse inanimée, peuvent introduire dans l'énergie homogène du sphéroïde gazeux primordial dont le soleil et la terre sont sortis lentement, par projection ou évolution ; — supposez, toutes les fois qu'il observait le phénomène du choc entre deux solides et le transport apparent du mouvement visible de l'un à l'autre, que ses pensées se fussent involontairement tournées vers la forme embryonnaire du phénomène, la contraction et l'expansion alternatives d'un gaz mobile sans forme : dans ce cas, aurait-il écrit cette phrase : « Il

ne peut y avoir d'autre cause de mouvement qu'un corps contigu en mouvement ? »

L'inadmissibilité logique et mathématique de l'hypothèse de la solidité absolue des atomes ou molécules étendues fut indiquée, dans la première partie du siècle dernier, par Jean Bernouilli ; il prouva qu'elle impliquait une puissance infinie de résistance à la déformation ou compression. Fries a montré, il y a plus de soixante-dix ans, que la solidité n'est pas le plus simple, mais le plus compliqué des caractères de la structure de la matière : il objectait à toutes les théories atomiques « qu'elles supposaient ce qui est le plus difficile, c'est-à-dire la constitution de formes définies, comme une donnée originale, et comme le point de départ d'une explication ¹, tandis que la grande difficulté de la philosophie mathématique de la nature est la possibilité de corps rigides ² ».

La solidité absolue de la matière est une des formes sous lesquelles le pseudo-concept d'« être pour soi » ou de « simple existence » prétend s'affirmer, en dépit de la relativité essentielle des choses matérielles. C'est ce que je me propose de discuter dans le chapitre suivant.

1. Fries, *Mathematische Naturphilosophie* (Heidelberg, 1822), p. 446.

2. Id., *Ibid.*, p. 616. On remarquera que Fries devance ici l'observation de Cournot, citée plus haut.

CHAPITRE XII

CARACTÈRE ET ORIGINE DE LA THÉORIE MÉCANIQUE

(SUITE).

ELLE EST UN EXEMPLE DE LA QUATRIÈME ERREUR RADICALE DE LA MÉTAPHYSIQUE

La réalité de toutes les choses qui sont ou peuvent être objets de connaissance est fondée sur leurs relations mutuelles, ou plutôt, est constituée par ces relations. Une chose en soi et par soi ne peut ni être saisie, ni être conçue ; son existence n'est ni une représentation des sens ni une donnée de la pensée. Les choses ne nous sont connues que par leurs propriétés, et les propriétés des choses ne sont rien de plus que leurs actions mutuelles ou leurs rapports. « Toute propriété ou qualité d'une chose, — dit Helmholtz ¹ en parlant de ce préjugé invétéré d'après lequel les qualités des choses doivent être analogues ou identiques aux perceptions que nous en avons, — se ramène en somme à la propriété de produire certains effets sur d'autres choses. L'action a lieu, soit entre parties semblables du même corps, de façon à produire des différences d'agrégation, soit entre un corps et un autre, comme dans le cas des réactions chimiques ; ou encore, les effets sont produits sur nos organes des sens et se manifestent comme sensations telles que celles dont il s'agit ici, les sensations de vue. Un tel effet s'appelle une « propriété », son réactif étant sous-entendu sans être expressément mentionné.

¹. *Die neueren Fortschritte in der Theorie des Sehens*, Pop. wiss. Vortraege, II, 55, seq.

» Ainsi on appelle « *solubilité* » d'une substance la manière dont elle se comporte à l'égard de l'eau ; « *poids* » la façon dont elle se comporte à l'égard de l'attraction de la terre ; nous pouvons justement appeler une substance « bleue », avec cette supposition tacite qu'on parle seulement de son action sur un œil normal. Puisque ce qu'on appelle *propriété* implique toujours une relation entre deux choses, une propriété ou une qualité ne peut jamais dépendre de la nature d'un seul agent : elle n'existe qu'en relation et en dépendance avec la nature d'un second objet qui reçoit l'action. Donc, c'est dire une chose dépourvue de sens que de parler de propriétés de la lumière, lui appartenant à titre absolu, indépendamment de tous les autres objets supposés représentables dans les sensations de l'œil humain. La notion de pareilles propriétés est contradictoire en elle-même. Elles ne peuvent pas exister. Nous ne devons donc pas nous attendre à trouver une coïncidence quelconque entre nos sensations de couleur et les qualités de la lumière. »

La vérité contenue dans ces passages est d'une telle importance qu'il est presque impossible d'être trop affirmatif dans l'expression ou trop prolixe dans les exemples. L'existence réelle des choses est coextensive avec leurs déterminations qualitatives et quantitatives. Les unes et les autres sont au fond des relations, la qualité résultant de l'action mutuelle, et la quantité étant simplement un rapport entre des termes dont aucun n'est absolu. Toute chose réelle objectivement est ainsi un terme dans une série indéfinie de choses mutuellement dépendantes ; en dehors de ces dépendances, il n'y a pas de forme de la réalité connue à l'expérience ni à la pensée. Il n'y a pas de quantité matérielle absolue, pas de substance matérielle absolue, pas d'unité physique absolue, pas d'entité physique absolument simple, pas de constante physique absolue, pas de type absolu, ni de qualité ni de quantité, pas de mouvement absolu, pas de repos absolu, pas de temps absolu, pas d'espace absolu. Il n'y a pas de forme d'existence matérielle qui soit son propre support ni sa propre mesure, et qui subsiste, sous le rapport soit de la qualité, soit de la quantité, autrement que dans un changement perpétuel, dans un flux incessant de mutations. Un objet est grand comparé à un autre, qui, relativement au premier est petit, mais

qui, relativement à un troisième, pourrait être infiniment grand. La comparaison qui détermine la grandeur des objets se fait entre ces termes seuls, mais non entre tous ces termes ou un de ces termes et un type *absolu*. Un objet est dur, comparé à un autre qui est mou, mais qui pourra être mis en contraste avec un autre encore plus mou; il n'y a aucun objet type qui soit absolument dur ou absolument mou. Un corps est simple, comparé au composé dans lequel il entre comme constituant; mais il n'y a et il ne peut y avoir aucune chose physique qui soit réellement simple¹.

On peut observer, à ce propos, que non seulement ce qu'on appelle la loi de causalité, la conservation de l'énergie et l'indestructibilité de la matière, ont leur racine dans la relativité de toute réalité objective — car ce ne sont, en fait, que différents aspects de cette relativité — mais que la première et la troisième loi de Newton ainsi que toutes les lois de moindre action en mécanique (y compris la loi du mouvement sous la moindre contrainte, de Gauss) ne sont que des corollaires du même principe. Ce fait que chaque chose, dans son existence manifeste, n'est qu'un groupe de relations et de réactions, rend compte en même temps de la finalité interne de la nature.

Toute la connaissance que nous avons de la réalité objective repose sur des relations établies ou reconnues. Quoique cette vérité, parfaitement évidente, ait été souvent proclamée, elle est restée jusqu'ici presque absolument ignorée des hommes de science aussi bien que des métaphysiciens. Encore aujourd'hui, les physiciens et les mathématiciens, de même que les ontologistes, supposent toute réalité absolue dans ses derniers éléments. Cette supposition est affirmée d'une manière particulièrement énergique par ceux dont la croyance

1. Un des plus remarquables spécimens de raisonnement ontologique est l'argument qui, de l'existence de substances composées, infère l'existence de substances absolument simples. Leibnitz place cet argument en tête de sa « Monadologie ». « Necessè est, dit-il, dari substantias simplices quia dantur compositæ; neque enim compositum est nisi agregatum simplicium. » (*Leibnitii opera omnia*, éd. Dutens, t. II, p. 21.) Mais cet enthymème est évidemment un paralogisme vicieux, — une erreur de l'espèce connue en logique sous le nom d'erreurs de relatif supprimé. L'existence de substances composées prouve certainement l'existence de parties composantes qui, *relativement à cette substance*, sont simples. Mais elle ne prouve rien quant à la simplicité de ces parties en elles-mêmes.

scientifique repose sur cette proposition : toute notre connaissance des choses physiques vient de l'expérience. Ainsi le mathématicien — qui reconnaît pleinement la validité de cette proposition, et qui accorde en même temps que nous n'avons et ne pouvons avoir aucune connaissance actuelle des corps en repos ou en mouvement, si ce n'est par rapport à d'autres corps, — n'en déclare pas moins que le repos et le mouvement ne sont réels qu'en tant qu'eux et leurs principes, l'espace et le temps, sont absolus. Le physicien nous rappelle à chaque pas que, dans le champ de ses recherches, il n'y a pas de vérités *a priori*, et que notre connaissance du monde matériel repose exclusivement sur l'observation et l'expérimentation ; il énonce donc, comme résultat constant de ses observations et de ses expériences, que toutes les formes de l'existence matérielle sont complexes et variables. Cependant il affirme ensuite, non seulement que les lois de leurs variations sont constantes, mais encore que les constituants réels du monde matériel sont des choses absolument simples, invariables, indivisibles.

Supposer que toute réalité physique est absolue dans ses derniers éléments, que l'univers matériel est un agrégat d'unités physiques absolument constantes, qui en elles-mêmes sont dans un repos absolu, mais dont le mouvement, de quelque façon qu'il soit transmis, est mesurable aux termes d'un espace et d'un temps absolu — telle est évidemment la base logique de la théorie atomo-mécanique. Cette supposition est identique à celle qui forme la base de tous les systèmes métaphysiques, avec cette seule différence, que, dans une partie de ces systèmes, le substratum physique du mouvement (appelé la « substance » des choses), n'est pas déterminé sous la forme d'atomes indivisibles.

Pour montrer de quelle manière irrésistible le préjugé ontologique, — que rien n'est physiquement réel sans être absolu, — s'est imposé dans la science durant les trois derniers siècles, je me propose de parcourir brièvement les doctrines de quelques-uns des plus éminents mathématiciens et physiciens sur l'espace, le mouvement, et aussi un peu le temps. Je commencerai par Descartes.

Dans les parties d'introduction de ses *Principia*, Descartes exprime, en termes fort explicites, que l'espace et le mouve-

ment sont essentiellement relatifs. « Pour que la place (d'un corps) puisse être déterminée, dit-il ¹, il faut le rapporter à d'autres corps que l'on doit considérer comme immobiles, et, selon que nous la rapportons à un corps ou à un autre, on pourra dire que la même chose change et ne change pas de place. Ainsi, quand un bateau côtoie le rivage, un homme assis à la poupe reste toujours à la même place par rapport aux parties du vaisseau au milieu desquelles il garde la même position ; mais il change continuellement de place par rapport au rivage. Ensuite, si nous accordons que la terre, en s'avancant de l'ouest à l'est possède une vitesse précisément égale à celle avec laquelle, pendant le même temps, le vaisseau s'avance de l'est à l'ouest, nous dirons de nouveau que l'homme qui est assis à la poupe ne change pas de place, parce que nous déterminons sa place par rapport à certains points immobiles dans les cieux. Si nous accordons enfin qu'il n'y a pas dans l'univers de points véritablement immobiles, — comme je montrerai plus tard que cela est probable, — notre conclusion sera que rien n'a une place fixe, si ce n'est en tant que déterminée par la pensée ². »

On trouve des propositions du même genre dans plusieurs autres endroits du même livre ³. Quant à l'espace, Descartes n'hésite pas à dire qu'il n'est en réalité rien par lui-même, et qu'un « espace vide » est une contradiction dans les termes ; — que, suivant le mot de sir J. Herschell ⁴, sans la mesure qui les sépare, ses deux extrémités seraient à la même place. » Mais, dans la suite de ces discussions, après avoir déclaré que Dieu conserve toujours dans l'univers la même quantité de mouvement, il considère du premier coup comme certain que le mouvement et l'espace sont absolus, et par suite constituent des entités réelles ⁵.

1. *Princ.*, II, § 18.

2. L'exemple du mouvement d'un bateau pour montrer la relativité du mouvement revient constamment toutes les fois qu'on se reporte à la question discutée dans ce texte. Cf Leibnitz, *Opp.*, éd. Erdmann, p. 604 ; Newton, *Princ.*, Def. VIII, schol. 3 ; Euler, *Theoria Motus Corporum solidorum, Metaphysische Anfangsgründe der Wissenschaft*, Phor. Grundsatz, I ; Cournot, *De l'Enchaînement*, vol. I, p. 56 ; Herbert Spencer, *Premiers principes*, ch. III, § 17, etc., etc.

3. E. g., *Princ.*, II, 24, 25, 29, etc.

4. *Familiar Lectures*, p. 455.

5. *Princ.*, II, §§ 37-39.

Cette contradiction de Descartes est sévèrement critiquée par Leibnitz. « Il suit de là, dit Leibnitz ¹, que le mouvement n'est qu'un changement de place, et, consiste en une simple relation tant qu'il s'agit de phénomènes. C'est ce que savait aussi Descartes; mais, en déduisant les conséquences, il oublia sa propre définition, et formula ses lois du mouvement *comme si le mouvement était quelque chose de réel et d'absolu.* » On le remarquera, Leibnitz suppose ici, comme allant de soi, que ce qui est réel est également absolu. Aussi, n'est-il guère surprenant de le voir tomber lui aussi dans la même contradiction dont il accuse Descartes : dans ses lettres à Clarke, il parle en effet d'« espace absolument immobile » et d'un « mouvement absolument véritable des corps » ².

Newton, — dans le grand scolie à la dernière des « Définitions » mises en tête de ses *Principia*, — fait une distinction subtile entre le temps ou le mouvement absolus et le temps ou le mouvement relatifs. « Le temps absolu et mathématique, dit-il ³, qui, en lui-même et par nature, n'a aucune relation avec aucune chose extérieure, coule également, et s'appelle aussi durée; le temps vulgaire, apparent, relatif est toute mesure sensible et extrinsèque, rigoureuse ou inégale, de la durée par le mouvement, que l'on prend ordinairement pour le véritable temps..... Le temps absolu se distingue du temps relatif, en astronomie, par l'équation du temps vulgaire. Car les jours naturels, qui, dans la mesure du temps, sont vulgairement pris comme égaux, sont inégaux..... *Il est possible qu'il n'y ait aucun mouvement uniforme par lequel le temps soit rigoureusement mesuré* ⁴. »

« L'espace absolu, qui n'a de relation dans son essence, avec aucune chose extérieure, reste toujours identique et immobile; l'espace relatif est toute mesure mobile, ou dimension, de l'espace absolu, qui se définit d'une manière sensible par sa place relativement aux corps, et qu'on prend d'ordinaire pour l'espace immuable ⁵..... Nous définissons tous les lieux par les distances des choses à un corps (donné) que nous considérons

1. Leibn., *Opp. Math.*, éd. Gerhardt, sect. II, vol. II, p. 247.

2. *Opp.*, éd. Erdmann, pp. 766, 770.

3. *Princ.* (éd. La Seur et Jacq.), p. 8.

4. *L. c.*, p. 40.

5. *Ibid.*, p. 9.

comme immobile..... *Il est possible qu'il n'y ait pas de corps vraiment en repos auquel les lieux et les mouvements puissent être rapportés*¹. »

Le mouvement absolu, selon Newton, est « la translation d'un corps d'un lieu absolu à un autre », et le mouvement relatif « la translation d'un corps d'un lieu relatif à un autre... Le repos et le mouvement absolus se distinguent du repos et du mouvement relatifs par leurs propriétés, par leurs causes et par leurs effets. C'est la propriété du repos que les corps vraiment en repos sont en repos les uns relativement aux autres. Par suite, tandis qu'il est possible que dans la région des étoiles fixes ou bien au delà d'elles, il y ait un corps absolument en repos, néanmoins il est impossible de savoir d'après les lieux relatifs des corps dans nos régions si un point semblable et si éloigné persiste dans la position donnée; le vrai repos ne peut donc être défini d'après la position mutuelle de ces corps. » (C'est-à-dire des corps dans nos régions). « C'est la propriété du mouvement que les parties qui conservent leurs positions données par rapport au tout, participent à son mouvement. Car toutes les parties des corps en rotation tendent à s'éloigner de l'axe du mouvement, et l'impulsion du corps qui se meut vient des impulsions des parties. Par suite, quand les corps environnants se meuvent, ceux qui se meuvent au-dedans d'eux sont relativement en repos. *Et pour cette raison le mouvement vrai et absolu ne peut pas être défini par leur translation d'après le voisinage des corps que l'on considère comme étant en repos*²..... Les causes par lesquelles le mouvement vrai et le mouvement relatif se distinguent l'un de l'autre sont les forces appliquées au corps pour la production du mouvement. Le vrai mouvement n'est engendré ou changé que par des forces appliquées sur le corps mù. Le mouvement relatif au contraire peut être engendré et changé sans l'action de forces appliquées sur ce corps lui-même; il suffit d'agir sur les autres corps auxquels on le rapporte, de manière à produire un changement dans la relation qui constitue le mouvement ou le repos relatif du corps considéré³..... Les effets par lesquels le mouvement

1. *Ibid.*, p. 10.

2. *Ibid.*, p. 10, 11.

3. *L. c.*, p. 11.

absolu et le mouvement relatif se distinguent l'un de l'autre, sont les forces par lesquelles les corps s'éloignent de l'axe du mouvement circulaire. Car dans le mouvement circulaire purement relatif, ces forces sont nulles, tandis que, dans le mouvement vrai et absolu, elles sont plus ou moins grandes selon la quantité de mouvement¹. »

On voit que, dans ses définitions, Newton, comme Descartes et Leibnitz, suppose absolu le mouvement réel, et prend comme rigoureusement synonymes les termes de *mouvement relatif* et de *mouvement apparent*, tout en admettant expressément — dans les passages imprimés en italique — qu'en fait il n'y a peut-être ni temps absolu, ni espace absolu. Ceci posé, il est naturellement conduit à admettre aussi qu'en fait il n'y a peut-être pas de mouvement absolu ; mais, pour trouver un fondement solide à la distinction du mouvement absolu et du mouvement relatif, malgré la non-existence possible du temps et de l'espace absolus, Newton a recours à ce qu'il appelle leurs causes et leurs effets respectifs. Mais ces causes et ces effets servent à distinguer, non le changement de position relatif du changement de position absolu, mais simplement le changement de position d'un corps par rapport à un autre, des changements de position simultanés des deux corps par rapport à un troisième.

La doctrine de Newton est poussée à ses dernières conséquences par Leonhard Euler. Dans le premier chapitre de sa « Théorie du mouvement des corps solides ou rigides », Euler commence par insister sur ce que le repos et le mouvement, en tant que connus à l'expérience sensible, sont purement relatifs. Après avoir cité le cas typique du navigateur dans son vaisseau, il continue² : « La notion de repos ici mentionnée est donc une notion de relation, en tant qu'elle n'est pas seulement dérivée de la condition du point O auquel elle est attribuée, mais aussi d'une comparaison avec quelque autre point A..... On voit par là que le même corps, qui est en repos par rapport au corps A, est en mouvement de plusieurs manières par rapport aux autres corps..... Ce qui a été dit du repos relatif peut être facilement appliqué au mouvement

1. *L. c.*, p. 11.

2. *Theoria motus Corp. Sol.*, etc., cap. 1, explic. 2.

relatif ; car lorsqu'un point O reste à la même place par rapport à un corps A, il est dit relativement en repos, et s'il change continuellement de place par rapport à ce corps, il est dit relativement en mouvement ¹. *Il n'y a donc entre le mouvement et le repos qu'une distinction purement nominale et non une opposition de fait, puisque tous les deux peuvent être attribués en même temps au même point, selon qu'on le rapporte à des corps différents. Il n'y a pas entre le mouvement et le repos d'autre différence qu'entre un mouvement et un autre* ² ».

Après avoir ainsi insisté sur la relativité essentielle du repos et du mouvement, Euler, dans le second chapitre : « Sur les principes internes du mouvement », passe à cette question : Le repos et le mouvement sont-ils ou non attribuables à un corps, indépendamment de tout rapport avec d'autres corps ? Il n'hésite pas à répondre affirmativement, considérant comme un axiome que « tout corps, même sans considération des autres corps, est soit en repos, soit en mouvement ; c'est-à-dire soit absolument en repos, soit absolument en mouvement ³ ». Il s'explique : « Jusqu'ici, suivant le témoignage des sens, nous n'avons reconnu de mouvement ni de repos que relativement à d'autres corps, et, par suite, nous avons appelé relatifs et le mouvement et le repos. Mais supprimons maintenant par la pensée tous les corps, sauf un, et retranchons ainsi le rapport à l'aide duquel nous avons jusqu'ici distingué son repos de son mouvement : sur le repos ou le mouvement du corps qui reste seul, sera-t-elle encore vraie dans cet état imaginaire ? On peut se le demander, car, si cette théorie résulte simplement de la comparaison de la place du corps en question avec celle des autres corps, il en résulte que, ces corps supprimés, la conclusion l'est aussi. Mais, quoique nous ne connaissions le repos et le mouvement d'un corps que par rapport à d'autres corps, il ne faut pas en conclure que ces choses (repos et mouvement) ne soient, en elles-mêmes, qu'une pure relation établie par

1. *Ibid.*, p. 7.

2. *Ibid.*, p. 8.

3. « Omne corpus, etiam sine respectu ad alia corpora, vel quiescit vel movetur, hoc est, vel absolute quiescit, vel absolute movetur. » *Ibid.*, p. 30 (cap. II, axioma 7).

l'esprit, et qu'il n'y ait rien d'inhérent aux corps eux-mêmes qui corresponde à nos idées de repos et de mouvement. Quoique nous soyons incapables de connaître la quantité autrement que par comparaison, cependant, quand les choses avec lesquelles nous établissons la comparaison sont supprimées, il reste encore dans le corps le *fundamentum quantitatis*, pour ainsi dire ; car s'il s'étendait ou se contractait, son extension et sa contraction devraient être prises comme des changements vrais. Ainsi, s'il n'existait qu'un seul corps, nous devrions dire qu'il est en mouvement ou en repos, attendu que ce doit être l'un ou l'autre. *D'où je conclus que le repos et le mouvement ne sont pas simplement des choses idéales, nées d'une comparaison, de sorte qu'il n'y aurait rien d'inhérent aux corps qui leur correspondit*, mais que l'on peut justement demander, au sujet d'un corps solitaire, s'il est en mouvement ou en repos.... Donc, puisque nous pouvons justement demander sur un seul corps, indépendamment de tout autre, ou en supposant que tous les autres soient anéantis, s'il est en repos ou en mouvement, nous devons nécessairement prendre l'une ou l'autre alternative. Quant à ce qu'est ce repos ou ce mouvement, étant donné ce fait qu'il n'y a pas ici changement de place par rapport à d'autres corps, nous ne pouvons pas même le penser sans admettre un espace absolu dans lequel notre corps occupe une place donnée, d'où il peut passer à d'autres lieux ¹. » D'après cela, Euler insiste énergiquement sur la nécessité d'admettre un espace absolu et immuable. « Quiconque nie l'espace absolu », dit-il, « tombe dans les plus graves perplexités. Dès qu'il est contraint de rejeter le repos et le mouvement absolus comme des sons vides et dépourvus de sens, il est contraint, non seulement de rejeter aussi les lois du mouvement, mais encore d'affirmer qu'il n'y a pas de lois du mouvement. Car si la question qui nous a conduits à ce point : Quelle sera la condition d'un corps solitaire, détaché de toute connexion avec les autres corps ? est absurde, alors aussi ce que ce corps reçoit de l'action des autres devient incertain et indéterminable, ce qui obligerait à dire que toute chose arrive fortuitement et sans raison ². »

1. *Theoria motus* etc., p. 31.

2. *Ibid.*, p. 32.

Il est clair que la base de tout ce raisonnement est purement ontologique. Et quand les penseurs du dix-huitième siècle devinrent attentifs aux illusions de la spéculation ontologique, l'inexactitude de l'« axiome » d'Euler, — que le repos et le mouvement sont des entités attributives substantielles indépendantes de toute relation, — ne pouvait guère échapper à leur remarque. Mais ils ne réussirent pas à s'émanciper tout à fait des préoccupations ontologiques d'Euler. Ils n'évitèrent pas, du premier coup, son dilemme, en le répudiant comme sans fondement, — en disant que le mouvement et le repos peuvent être réels sans être absolus, — mais ils tentèrent de concilier la réalité absolue du repos et du mouvement avec leur relativité phénoménale, en admettant dans l'espace un point ou centre absolument immobile auquel on pourrait rapporter les positions de tous les corps. Le principal de ceux qui firent cette tentative fut Kant⁴. Au

4. Il est remarquable combien de découvertes scientifiques, spéculations et imaginations de notre temps ont été devancées ou au moins esquissées dans les écrits de Kant. Zöllner en énumère quelques-unes (*Natur der Kometen*, p. 433, seq.) — entr'autres la constitution et le mouvement des systèmes d'étoiles fixes; l'origine nébuleuse des systèmes planétaires et stellaires; l'origine, la constitution et la rotation des anneaux de Saturne et les conditions de leur stabilité; la non-coïncidence du centre de gravité de la lune avec son centre de figure; la constitution physique des comètes; le retard, causé par les marées, du mouvement de rotation de la terre; la théorie des vents, et la loi de Dove. Fritz Schulze a montré (Kant et Darwin, *Jena*, 1873) que Kant fut un des précurseurs de Darwin. A ce propos il est curieux de noter une coïncidence (sans doute tout-à-fait accidentelle) dans l'exemple auquel ont également recours Kant et A.-R. Wallace pour mettre en lumière « l'adaptation par loi générale ». Le cas cité par tous les deux est celui du chenal d'une rivière qui, aux yeux des partisans des causes finales, « doit, dit Wallace (*Contributions to the Theory of Natural Selection*, p. 276, seq.), avoir été fait à dessein : il remplit son but si exactement ! » ou comme le dit Kant, doit avoir été creusé par Dieu lui-même (« Wenn man die physisch-theologischen Verfasser hoert, so wird man dahin gebracht, sich vorzustellen, ihre Laufninnen waeren alle von Gott ausgehoelt, » *Beweisgrund zu einer Demonstration des Daseins Gottes, Kant's, Werke*, I, p. 232.) Il y a même dans les essais de Kant des suggestions des divagations de la géométrie transcendantale moderne, *Von der wahren Schaeztung der lebendigen Kraefte*, *Werke*, V, p. 5, et *Von dem ersten Grunde des Unterschiedes der Gegenden im Raume*, *ibid.*, p. 293. — Fait qui ne contribuera pas sans doute à l'édification de ceux qui, comme J.-K. Becker, Tobias, Weissenborn, Krause, etc., ont levé l'étendard Kantien pour la défense de l'espace Euclidien. Ce n'est probablement pas sans raison que, dans la 2^e édition de la *Critique de la Raison pure*, Kant omet le troisième paragraphe de la première section de l'*Esthétique Transcendantale*, dans lequel il avait montré la nécessité d'admettre le caractère *a priori* de l'idée d'espace, par cet argument que, sans cette supposition, les propositions de la géométrie cesseraient d'être vraies apodicti-

chapitre VII de son « Histoire naturelle du ciel », — ce même ouvrage où, près de cinquante ans avant Laplace, il donnait la première esquisse de l'hypothèse de la nébuleuse, — il chercha à montrer que, dans l'univers, il y a quelque part un grand corps central dont le centre de gravité est le point cardinal auquel se rapportent les mouvements de tous les corps. « Si, dit-il, dans l'espace incommensurable, où tous les soleils de la voie lactée se sont formés, on suppose un point autour duquel, par une cause quelconque, la première action formative de la nature s'est mise en jeu, à ce point, il a dû se former un corps ayant la masse la plus vaste, et les attractions les plus considérables. Ce corps doit être devenu capable de forcer tous les systèmes qui étaient en voie de formation dans l'énorme sphère environnante, de graviter autour de lui comme centre, de façon à constituer un système entier, analogue au système solaire et planétaire qui se développa sur une petite échelle, en sortant du sein de la matière élémentaire ¹. »

Une suggestion analogue à celle de Kant a été faite récemment par le professeur C. Neumann, qui corrobore par des considérations physiques la nécessité de supposer l'existence, à un point déterminé et constant de l'espace, d'un corps absolument rigide, au centre de figure ou d'attraction duquel on devrait rapporter tous les mouvements. Le but de son raisonnement apparaît dans les extraits suivants de sa leçon inaugurale sur les principes de la Théorie Galiléo-Newtonienne ² : « Les principes de la théorie galiléo-newtonienne consistent en deux lois, — la loi d'inertie proclamée par Galilée, et la loi d'attraction ajoutée par Newton.... Un point matériel, une fois mis en mouvement, libre de l'action de toute force extérieure, et complètement livré à lui-même, continue à se mouvoir en ligne droite de façon à parcourir des espaces égaux en des temps égaux. Telle est la loi d'inertie de Galilée. Il est impossible que cette proposition demeure, sous cette forme, la pierre angulaire de l'édifice scientifique, attendu que nous ne savons ce que c'est qu'un « mouvement en ligne droite »,

quement, et que • tout ce qu'on pouvait dire des dimensions de l'espace, c'était que *jusqu'ici* on n'avait pas trouvé d'espace à plus de trois dimensions ».

1. *Naturgeschichte des Himmels*, Werke, vol. VI, p. 152.

2. *Ueber die Principien der Galileo-Newton'schen Theorie*. Leipzig, B. G. Teubner, 1870.

ou plutôt attendu que nous savons ces mots — « mouvement en ligne droite » — susceptibles de plusieurs interprétations. Par exemple, un mouvement qui est rectiligne vu de la terre, serait curviligne vu du soleil, et serait représenté par une courbe différente chaque fois que nous transporterions notre point d'observation sur Jupiter, sur Saturne, ou sur quelque autre corps céleste. Bref, tout mouvement qui est rectiligne par rapport à un corps céleste paraîtra curviligne par rapport à un autre corps céleste.....

» Les paroles de Galilée, d'après lesquelles un point matériel abandonné à lui-même se meut en ligne droite, nous apparaissent donc dépourvues de sens — en tant qu'exprimant une proposition qui, pour devenir intelligible, a besoin d'un fondement défini. *Il doit y avoir dans l'univers quelque corps spécial qui soit la base de notre comparaison, qui soit l'objet par rapport auquel tous les mouvements doivent être estimés* ; ce n'est que quand un tel corps sera connu que nous serons capables d'attacher à ces paroles un sens déterminé. Or quel sera le corps occupant cette position éminente ? Ou bien y a-t-il plusieurs de ces corps ? Les mouvements voisins de la terre doivent-ils être rapportés au globe terrestre, par exemple, et les mouvements voisins du soleil à la sphère solaire ?...

» Malheureusement ni Newton, ni Galilée ne nous donnent une réponse déterminée à cette question. Mais si nous examinons avec soin la construction théorique qu'ils ont faite, et qui depuis a été continuellement agrandie, ses fondements ne peuvent plus rester cachés. *Nous voyons facilement que tous les mouvements actuels et imaginables de l'univers doivent être rapportés à un seul et même corps*. Où est ce corps et quelles sont les raisons pour lui assigner cette position éminente et pour ainsi dire souveraine ? Ce sont des questions auxquelles il n'y a pas de réponse.

» *Il sera donc nécessaire d'établir, comme le premier principe de la théorie Galileo-Newtonienne, ce principe que, dans quelque endroit inconnu de l'univers, il y a un corps inconnu — un corps absolument rigide et immuable en tout temps, dans sa forme et ses dimensions. Qu'on me permette d'appeler ce corps « Le corps Alpha ». Il serait alors nécessaire d'ajouter que le mouvement d'un corps signifierait, non*

son changement de place par rapport à la terre ou au soleil mais son changement de position par rapport au corps Alpha.

» De ce point de vue la loi de Galilée a un sens déterminé. Ce sens se présente comme un second principe, qui est : qu'un point matériel abandonné à lui-même se meut en ligne droite — se meut par conséquent dans une direction qui est rectiligne par rapport au corps Alpha. »

Après avoir ainsi montré ou essayé de montrer que la réalité du mouvement nécessite son rapport à un corps rigide, immuable dans sa position dans l'espace; Neumann cherche à vérifier cette hypothèse en se posant cette question : Dans l'hypothèse de la relativité complète du mouvement, qu'arriverait-il si tous les corps étaient anéantis excepté un ? « Supposons, dit-il, que parmi les étoiles il y en ait une composée de matière fluide et qui soit, comme la terre, animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe passant par son centre. Par suite de ce mouvement, en vertu des forces centrifuges qu'il développe, cette étoile aura la forme d'un ellipsoïde. Quelle forme maintenant prendra cette étoile, si tous les autres corps célestes étaient soudain anéantis ?

» Les forces centrifuges dépendent uniquement de l'état de l'étoile elle-même : elles sont complètement indépendantes de l'état des autres corps célestes. Ces forces persisteront donc, aussi bien que la forme ellipsoïdale, malgré la continuation d'existence ou la disparition des autres corps. Mais si le mouvement est défini comme quelque chose de relatif — comme un changement de position relative de deux points, — la réponse est bien différente. Si, dans cette hypothèse, nous supposons anéantis tous les autres corps célestes, il ne reste plus que les points matériels dans lesquels l'étoile en question consiste. Mais alors ces points ne changent pas de position relative, et sont par conséquent en repos. Il suit de là que l'étoile doit être en repos au moment où l'anéantissement des autres corps se produit et par suite prendre la forme sphérique que prennent tous les corps à l'état de repos. Une contradiction si insupportable, ne peut être évitée qu'en abandonnant l'hypothèse de la relativité du mouvement, et en concevant le mouvement comme absolu, de sorte que nous revenons ainsi au principe du corps Alpha. »

Que peut-on répondre à ce raisonnement du professeur Neumann ? Rien, si nous regardons comme possibles l'anéantissement de tous les corps qui sont dans l'espace, excepté un, et l'hypothèse d'un corps absolument rigide avec une place absolument fixe dans l'univers. Mais cette concession est interdite par le principe universel de la relativité. En premier lieu, l'anéantissement de tous les corps sauf un, n'aurait pas seulement pour effet de détruire le *mouvement* de ce corps resté seul et de le réduire au repos, ce que voit le professeur Neumann ; cela détruirait aussi son *existence* même et le réduirait à un néant, ce qu'il ne voit pas. Un corps ne peut pas survivre au système de relations qui en constitue la réalité ; sa *présence* ou *position* dans l'espace n'est pas plus possible sans rapport avec d'autres corps que son *changement de position* ou de *présence* n'est possible sans ce rapport. On l'a suffisamment montré : toutes les propriétés d'un corps qui constituent les éléments de sa présence déterminable dans l'espace sont au fond des relations, et impliquent d'autres termes que le corps lui-même.

En second lieu, la fixité absolue dans l'espace attribuée au corps Alpha est impossible dans les conditions connues de la réalité. La fixité d'un point dans l'espace enveloppe la permanence de ces distances à quatre autres points fixes au moins, non situés dans le même plan. Mais la fixité de ces divers points dépend aussi de la constance de leurs distances à d'autres points fixes, et ainsi de suite *ad infinitum*. Bref, la fixité de position d'un corps dans l'espace n'est possible que si l'on suppose l'univers absolument fini : ceci conduit à la théorie de la courbure essentielle de l'espace, et aux autres théories de la géométrie transcendante moderne, qui seront discutées plus loin.

Il n'y a qu'un moyen de sortir des perplexités d'Euler, c'est de dire que la réalité du repos et du mouvement, loin de présupposer qu'ils sont absolus, dépend de leur relativité. On découvre facilement la source de ces perplexités. Il est à remarquer que, dans la vieille doctrine métaphysique, le Réel n'est pas seulement une forme distincte, mais l'opposé exact du Phénomène. Les phénomènes sont les données des sens ; et celles-ci sont dites contradictoires entre elles, et par suite trompeuses. Or, la vérité est qu'il n'y a pas de réalité phy-

sique qui ne soit phénoménale. La seule pierre de touche de la réalité physique, c'est l'expérience sensible. Cette assertion que le témoignage des sens est trompeur, telle qu'elle est faite par les métaphysiciens, est sans fondement. Le témoignage des sens n'est contradictoire que parce que la donnée momentanée de chaque sens est fragmentaire, et demande à être contrôlée et rectifiée, soit par d'autres données du même sens, soit par les données des autres sens. Quand le voyageur dans le désert voit devant lui un lac qui recule continuellement et finit par disparaître, se trouvant être un effet de *mirage*, on dit qu'il est déçu par ses sens, en tant que l'eau supposée était une pure apparence sans réalité. Mais ses sens ne le trompaient pas. Le lac était aussi réel que l'image. La déception venait des inférences erronées du voyageur, qui ne tenait pas compte de tous les faits ; il oubliait (ou ignorait) que la réfraction des rayons venant de l'objet réel, en changeait la direction, et par suite, la position apparente de l'objet. La vraie distinction entre l'Apparent et le Réel, c'est que le premier est une donnée partielle des sens, qui est prise pour la donnée totale. La déception ou l'illusion résulte de cette circonstance que les sens ne sont pas interrogés d'une façon convenable et complète, et qu'on ne les entend pas jusqu'au bout.

La tyrannie exercée par les notions ontologiques régnantes au temps d'Euler, sur l'esprit si clair de ce grand mathématicien, se montre de la façon la plus frappante dans cette proposition que, sans l'hypothèse de l'espace absolu, et du mouvement absolu, il ne pourrait pas y avoir de lois du mouvement, de sorte que tous les phénomènes de l'action physique deviendraient incertains et indéterminables. Si cet argument était bien fondé, la même conséquence résulterait *à fortiori* de ce qu'il admet à plusieurs reprises dans le premier chapitre de son livre, que nous n'avons pas d'autre connaissance actuelle du repos et du mouvement, que celle qui nous vient des corps en repos ou en mouvement relativement à d'autres corps. La proposition d'Euler ne peut avoir d'autre sens que celui-ci : les lois du mouvement ne peuvent être établies ou vérifiées sans connaître sa direction absolue et sa quantité absolue. Mais une telle connaissance, il le montre lui-même, est impossible. Il en résulte donc que l'établissement et la vérification des lois du mouvement est im-

possible. Cependant personne ne savait mieux qu'Euler lui-même que toute vérification expérimentale des lois dynamiques, *comme de tous les actes de connaissance*, repose sur l'isolement du phénomène ; qu'elle ne peut être effectuée qu'en dégageant les effets de certaines forces des effets des autres forces (déterminables *aliunde*, c'est-à-dire par leurs autres effets) avec lesquelles elles sont combinées, — procédé qui, dans bien des cas, est facilité par cette circonstance que ces derniers effets sont d'une petitesse inappréciable. Assurément la vérification de la loi d'inertie par les habitants de notre planète ne dépend pas de leur connaissance, à un moment donné, du chiffre exact de la vitesse angulaire de son mouvement autour du soleil ! La validité de la théorie newtonienne du mouvement du ciel n'est pas mise en question, parce que son auteur suggère que le centre de gravité de notre système solaire se meut dans quelque orbite elliptique, dont les éléments, non seulement sont inconnus, mais ne seront probablement jamais découverts ! On pourrait tout aussi bien prétendre que les théorèmes mathématiques sur les propriétés de l'ellipse sont d'une vérité douteuse, parce qu'une telle courbe n'est exactement décrite par aucun corps céleste, ou ne peut être exactement tracée par aucune main humaine !

Dans les opérations particulières de la pensée, nous pouvons bien être contraints pratiquement de traiter le complexe comme simple, le variable comme constant, le transitoire comme permanent, et ainsi, en un sens, de considérer les phénomènes « *sub quadam specie absoluti* »¹. Néanmoins il n'y a rien de vrai dans cette vieille maxime ontologique, que la nature réelle des corps peut être découverte en les séparant de leurs relations, — que pour être vraiment connus, ils doivent être connus tels qu'ils sont en eux-mêmes, dans leur essence absolue. Une telle connaissance est impossible, toute connaissance consistant à découvrir des relations ; et cette impossibilité ne se trouve nulle part mieux mise en relief que dans l'exposition, par Newton et Euler, de la réalité du repos et du mouvement sous les conditions de leur déterminabilité.

¹ « De natura rationis est res sub quadam æternitatis specie percipere », Spinoza, Eth., Pars II, Prop. XLIV, Coroll. 2.

Il résulte, d'ailleurs, de la relativité essentielle du repos et du mouvement que la distinction radicale que l'ancienne ontologie avait mise entre eux s'évanouit. Le repos diffère du mouvement en deux sens : d'après Euler, « comme un mouvement diffère d'un autre ¹ » ; d'après l'expression des mathématiciens et physiciens modernes, « le repos n'est qu'un cas particulier du mouvement ² ». Il résulte de ceci que le mouvement n'est pas logiquement et cosmologiquement le *primum* de l'existence matérielle, — qu'il n'est pas l'état naturel et original de l'univers, lequel n'a pas besoin d'être expliqué, tandis que l'on doit rendre compte de son mouvement ou de celui de ses parties. Ce qui a besoin d'être expliqué et, qui est susceptible de l'être, c'est toujours un changement à partir d'un état donné de repos ou de mouvement relatif dans un système matériel fini ; et l'explication consiste toujours à faire voir un changement équivalent dans un autre système matériel. La question de l'origine du mouvement, dans le monde pris dans son ensemble, n'admet donc pas de réponse parce qu'elle n'a pas de signification intelligible.

Les mêmes considérations qui établissent la relativité du mouvement attestent aussi la relativité de ses éléments conceptuels, l'espace et le temps. Pour l'espace, cela est évident à première vue. Pour le temps, pour la « grande variable indépendante » dont le cours, supposé continu, est donné comme la mesure ultime de toutes choses, il suffit de remarquer qu'elle est elle-même mesurée par le retour de certaines positions relatives d'objets ou de points de l'espace, et que les périodes de ce retour sont variables, puisqu'elles dépendent de conditions physiques variables. Cela est aussi vrai des données de nos mesures modernes du temps, — l'horloge et le chronomètre, — que de celles de la clepsydre et du sablier des anciens : tous sont sujets à des variations de frottement, de température, aux changements dans l'intensité de la pesanteur d'après la latitude des lieux d'observation, etc. Et cela est également vrai des indications des grandes horloges célestes, le soleil et les étoiles. Après que nous avons réduit

1. « Neque motus a quiete aliter differt atque alius motus ab alio. » *Theoria motus*, etc., p. 8.

2. « Die Ruhe ist nur ein besonderer Fall der Bewegung », Kirschhoff, *Vorlesungen ueber math. Physik*, p. 32.

notre jour solaire apparent au jour solaire moyen et celui-ci au jour sidéral, nous trouvons que l'intervalle entre deux passages aux points équinoxiaux n'est pas constant, mais devient irrégulier par suite de la précession des équinoxes et de nombreuses autres perturbations séculaires, et de variations dues à l'attraction mutuelle des corps célestes. La constance du cours du temps, comme celle des positions dans l'espace qui servent de base à notre détermination des quantités de mouvement physique, est une simple conception de l'esprit.

On a plusieurs fois parlé dans les chapitres précédents de la relativité de la masse. On a montré que la mesure de la masse est la réciproque de la valeur de l'accélération produite dans un corps par une force donnée, tandis que la force, à son tour, est mesurée par l'accélération produite dans une masse donnée. On voit facilement que le concept de masse pourrait être étendu, de façon à rattacher la mesure de la masse, non au mouvement mécanique seul, mais à l'action physique en général, y compris la chaleur et l'affinité chimique. Ceci conduirait à établir des équivalents des masses d'après la nature des agents choisis comme base de la comparaison. Des masses, équivalentes par rapport à la chaleur, correspondraient aux chaleurs spécifiques des masses telles qu'elles sont maintenant déterminées ; et des masses chimiquement équivalentes seraient ce qu'on appelle les poids atomiques. Il est important de noter que la détermination des masses d'après la gravitation plutôt que d'après la température, l'action chimique ou tout autre, résulte d'une convention arbitraire, et n'est fondée en aucun sens sur la nature des choses.

Même ce point écarté, le caractère simplement relatif de la masse devient encore manifeste, quand on considère la méthode ordinairement employée pour déterminer la masse d'un corps par son poids ; en effet, le poids d'un corps dépend non seulement de sa masse, mais de celle du corps ou des corps qui l'attirent, et de la distance entre ces corps. Un corps dont le poids, déterminé par la balance de précision ou le pendule, est d'une livre à la surface de la terre, ne pèserait que deux onces sur la lune, moins d'un quart d'onze sur plusieurs des planètes plus petites, environ six onces sur Mars, deux livres et demie sur Jupiter, et plus de vingt-sept livres sur le So-

leil. Tandis que la vitesse de la chute des corps dans le vide près de la surface de la terre est d'environ seize pieds pendant la première seconde (plus ou moins selon la latitude), la vitesse correspondante sur la surface du soleil est de plus de quatre cent trente-cinq pieds.

L'irréflexion avec laquelle beaucoup des physiciens les plus éminents supposent la matière composée de particules qui ont un poids primordial absolu persistant dans toutes les positions, dans toutes les circonstances, est un des faits les plus remarquables de l'histoire de la science. « Le poids absolu des atomes », dit le professeur Redtenbacher¹, « est inconnu ». Il veut dire évidemment, — d'après le contexte, et l'ensemble de la discussion, — que notre ignorance de ce poids absolu est due uniquement à l'impossibilité pratique d'isoler un atome et de trouver des instruments assez délicats pour le peser.

Il n'y a rien d'absolu ou d'inconditionné dans le monde de la réalité objective. Comme il n'y a pas de type absolu de qualité, de même il n'y a pas de mesure absolue de la durée, il n'y a pas de système absolu de coordonnées dans l'espace auquel on puisse rapporter les positions et les changements des corps. Un être par soi et une constante sont, en physique, également impossibles, car toute existence physique se résout en action et réaction, et action signifie changement.

1. *Dynamidensystem* (Manheim, Bassermann, 1837), p. 14.

CHAPITRE XIII

LA GÉOMÉTRIE NON EUCLIDIENNE

LA THÉORIE DE LA LIMITATION ABSOLUE DU MONDE ET DE L'ESPACE. — L'HYPOTHÈSE D'UN MAXIMUM ABSOLU D'EXISTENCE MATÉRIELLE COMME COMPLÉMENT NÉCESSAIRE DE L'ATOME, SON MINIMUM ABSOLU. — L'ONTOLOGIE EN MATHÉMATIQUES. — LA RÉIFICATION DE L'ESPACE. — LA GÉOMÉTRIE A QUATRE DIMENSIONS. — L'ESPACE NON-HOMALOIDAL (SPHÉRIQUE ET PSEUDO-SPHÉRIQUE).

On a montré dans le chapitre précédent que si l'espace et le mouvement ne sont réels qu'à la condition d'être absolus, on est conduit à supposer l'existence dans l'espace d'un point absolument fixe auquel on pût se rapporter, et que ceci conduisait en outre à la doctrine de la limitation absolue de l'univers. La connexion entre cette doctrine et les théorèmes ontologiques acceptés sur l'espace et le mouvement n'a pas encore été, que je sache, mise en lumière; mais la doctrine elle-même a été présentée, de plusieurs manières, dans l'intérêt des spéculations cosmologiques fondées sur la théorie atomo-mécanique, comme un moyen d'échapper à certaines conséquences inévitables de cette théorie. En fin de compte, ces spéculations se trouvent en désaccord avec elle. C'est ce que d'éminents mathématiciens lui ont reproché, il y a peu de temps, d'après des considérations sur la vraie nature de l'espace et le caractère réel des relations dans l'espace.

On voit facilement que l'affirmation de la limitation absolue

de l'univers matériel fait logiquement partie intégrante de cette affirmation générale que ce qui est réel est absolu : la supposition d'un maximum absolu d'existence matérielle est donc le complément nécessaire de la supposition d'un minimum absolu, l'atome. La première expression d'une croyance scientifique en ce maximum paraît avoir été donnée par C.-F. Gauss, dans une de ses lettres à Schumacher¹, dans laquelle il discute les tentatives de son ami le transylvanien Bolyai, et du géomètre russe Lobatschewsky pour fonder un système géométrique indépendant des axiomes d'Euclide sur les parallèles. Les suggestions de Gauss dans les lettres ci-dessus mentionnées et dans diverses parties de ses autres écrits², ont, pendant ces vingt dernières années, fait naître une discussion sur la nature de l'espace, sur le fondement de la géométrie et sur l'origine et le sens des axiomes géométriques, discussion qui forme une littérature déjà étendue et rapidement croissante³. La première impulsion effective donnée à ce nouveau mouvement de la théorie mathématique est due à une remarquable dissertation de Riemann⁴, lue devant la faculté de philosophie de Göttingen, le 10 juin 1854 (publiée par Dedekind en 1866, après la mort de Riemann), et par un essai⁵ également remarquable de Helmholtz, publié deux ans plus tard. Ces publications ont

1. Gauss, *Briefwechsel mit Schumacher*, vol. II, pp. 268-271.

2. Cf. « Disquisitiones generales circa seriem infinitam », etc. (Comm. recent. Soc. Gott., II, 1811-13) ; « Theoria residuorum biquadraticorum Commentatio secunda (*ibid.*, VII, 1828-32). Ceux qui sont familiarisés avec cette théorie de Herbart, que notre idée de l'étendue est une élaboration psychologique de données qualitatives, c'est-à-dire de sensations qui sont elles-mêmes sans étendue, ne trouveront pas improbable que le transcendentalisme mathématique de Gauss ne soit dû en quelque mesure aux spéculations de son collègue dans la faculté de philosophie de Göttingen, quoique Gauss professât habituellement un grand dédain pour le système de Herbart. — De même Descartes subit l'influence de son adversaire Gassendi. Il y a une connexion évidente entre les doctrines métagéométriques ou (pour employer l'expression de Lobatschewsky, pangéométriques, de Gauss, et ses recherches sur l'interprétation géométrique des quantités imaginaires et la théorie des « nombres complexes ».

3. Cf. Halstead, *Bibliography of Hyper-space and non-Euclidean Geometry*, *American Journal of Mathematics*, vol. I, pp. 261, seq. et 384, seq.; *ibid.*, vol. II, p. 65 seq.

4. *Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen* (*Abhandlungen der Kgl Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, vol. XIII, p. 133 seq.).

5. *Ueber die Thatfachen die der Geometrie zu Grunde liegen* (*Nachrichten der Kgl Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 1863, 3 juin).

été suivies de nombreux articles, pamphlets ou livres exposant la doctrine ainsi avancée, et, comme on devait s'y attendre, les critiques et les négations se sont succédé sans trêve.

Ces nouveaux articles de foi géométrique sont certainement effrayants. On y voit des propositions comme celles-ci : Notre espace ordinaire, « Euclidien », à trois dimensions, et « homaloïdal » (plat) n'est qu'une des formes possibles de l'espace. La prééminence de cet espace Euclidien sur les autres formes de l'espace ne peut être maintenue que pour des raisons empiriques ; d'après les dogmes logiques et psychologiques de l'école sensualiste, elle est simplement due à l'association accidentelle de notions, qui pourraient être dissociées. S'il faut en croire quelques avocats enthousiastes des nouvelles doctrines, cette dissociation a même été opérée en effet, car on aurait découvert des dimensions nouvelles de l'espace, affirmées comme une conséquence nécessaire de certains faits d'expérience impossibles à expliquer autrement — de même que la troisième dimension de l'espace est, dit-on, non pas directement perçue, mais simplement inférée de faits familiers d'expérience visuelle et tactile, pour l'explication desquels cette troisième dimension est une hypothèse indispensable.

L'espace vrai et réel a donc, ou tout au moins, peut avoir, non pas trois dimensions seulement, mais quatre, ou même un plus grand nombre. L'espace dans lequel nous nous mouvons est, ou peut être, non pas homaloïdal ou plat, mais non-homaloïdal, courbe, sphérique ou pseudo-sphérique : il en résulte que toute ligne considérée jusqu'ici comme droite, pourrait, étant suffisamment prolongée, constituer une courbe fermée, en raison de la courbure inhérente à l'espace. L'univers, quoique illimité, pourrait ainsi être, et est probablement non pas infini, mais fini. En effet, si on admet le caractère pseudo-sphérique de l'espace, tout un faisceau de « lignes les plus courtes possibles » peuvent être tracées par le même point, toutes également parallèles à un autre faisceau donné de « lignes les plus courtes possibles » en ce sens qu'elles ne se couperont jamais, à quelque distance qu'on les prolonge. D'un autre côté, la mesure de la courbure de l'espace, ainsi que le nombre de ses dimensions, peut être, et est probablement

différente dans différentes régions de l'espace, de sorte que notre expérience pour les régions dans lesquelles il nous arrive d'habiter, ne nous permet de rien inférer légitimement quant à la courbure et aux dimensions d'autres régions de l'espace incommensurablement éloigné, ou incommensurablement petit. Bien plus, dans une région donnée quelconque, la courbure de l'espace et le degré ou le nombre de ses dimensions peuvent être, et sont probablement, en train de subir une transformation graduelle; — et ainsi de suite ¹.

1. Les plus prudents des pangéomètres ont à la fin montré une disposition à condamner quelques-unes des doctrines ci-dessus énumérées, — particulièrement l'accroissement du nombre des dimensions de l'espace, ainsi que les différences et changements locaux dans la constitution de l'espace, — comme des inventions de leurs ennemis ou des extravagances de personnes emportées par l'enthousiasme. Qu'on me permette donc de citer un passage d'une leçon du professeur P.-G. Tait (qui est cependant assez disposé, comme le montre le livre que je cite, à insister sur la sobriété en physique et en mathématiques au moins, quelle que soit, dans son opinion, la forme d'esprit qui convient pour examiner l'« Univers Invisible ») : « Les propriétés de l'espace, dit Tait, ayant (nous ne savons pourquoi) les trois dimensions pour élément essentiel, ont été récemment soumises à un examen attentif par des mathématiciens de premier ordre, comme Riemann et Helmholtz; et les résultats de leurs recherches laissent encore incertain si l'espace peut avoir ou ne pas avoir les mêmes propriétés à travers tout l'univers. Pour vous faire une idée de ce que signifie cette proposition, considérez qu'en froissant une feuille de papier, — on la prend comme représentant l'espace à deux dimensions, — il pourra y avoir des parties planes, et d'autres plus ou moins courbées cylindriquement ou coniquement. Or, un habitant d'une telle feuille, quoique vivant dans l'espace à deux dimensions seulement et fort incapable d'apprécier la troisième dimension, sentirait certainement quelque différence de sensation en passant de parties moins courbées de son espace à d'autres plus courbées. Il est donc possible que, dans la marche rapide de système solaire à travers l'espace, nous puissions graduellement passer à des régions dans lesquelles l'espace n'a pas précisément les propriétés que nous lui trouvons ici — où il y a peut-être quelque chose à trois dimensions, analogue à la courbure à deux dimensions — quelque chose, qui, en fait, impliquera nécessairement un changement de forme selon une quatrième dimension dans les parties de la matière, afin qu'elles puissent s'adapter à leur nouveau lieu. » P.-G. Tait, *On some Recent Advances in Physical science*, p. 3. Rapprochons ce passage de la note suivante d'un grand mathématicien, le professeur J.-J. Sylvester, dans son discours d'ouverture à la section physico-mathématique de l'Association Britannique à Exeter, en 1869 : « Il est bien connu de ceux qui sont entrés dans ces vues, que les lois du mouvement, accepté comme fait, suffisent à prouver d'une manière générale que l'espace où nous vivons est plat (ou de niveau homaloïde), notre existence y étant assimilable à la vie d'un ver dans une page de livre; mais qu'arriverait-il si la page subissait une inclinaison graduelle et prenait une forme courbe? M. W. K. Clifford s'est livré à de remarquables spéculations sur la question de savoir si nous sommes capables d'inférer, de certains phénomènes inexplicables de lumière et de magnétisme, ce fait que notre espace plat de trois dimensions est en train de subir dans l'espace à quatre dimensions (espace aussi inconcevable pour nous que notre espace pour le ver

Bien que ces propositions jurent avec les enseignements de notre expérience familière, on prétend qu'elles ne sont nullement sans garantie expérimentale. On insiste sur de nombreux phénomènes d'optique, de magnétisme ou autres, dont elles donnent la seule explication suffisante. De plus, on dit qu'elles seules fournissent un fil conducteur pour les mystères du spiritisme moderne, qu'elles nous permettent de replacer dans la chaîne de la causalité naturelle certaines pratiques magiques qu'autrement on serait contraint de renvoyer aux régions du surnaturel. Dans le premier article du premier numéro de l'*American Journal of Mathematics*, le professeur Simon Newcomb démontre analytiquement que, « si l'on ajoutait à l'espace une quatrième dimension, une surface matérielle fermée (ou enveloppe) pourrait être retournée de dedans en dehors par simple flexion, sans l'étendre ni la briser ». Félix Klein avait montré quelque temps auparavant que les nœuds ne pourraient pas durer dans un espace à quatre dimensions. D'autre part, le professeur Zoellner rend compte des exploits bien connus du « médium » américain Slade, par le principe de la quatrième dimension ; et pourtant chose assez étrange, un de ces exploits consistait dans la production de véritables nœuds en trèfle dans une corde dont les extrémités étaient scellées ensemble et tenues par Zoellner. Finalement, on affirme que les théorèmes de Lobatschewsky, Riemann, Helmholtz et Beltrami ¹ sont la seule base de toute

supposé) une torsion analogue au froissement d'une page. Je sais que beaucoup, comme mon honoré et profondément regretté ami, l'éminent professeur Doukin, regardent la prétendue notion d'espace généralisé comme une forme déguisée de formulation algébrique. Mais on pourrait dire la même chose, avec une égale vérité, de notre notion de l'infini en algèbre, ou en géométrie des lignes impossibles et des lignes faisant un angle nul, dont personne ne contestera qu'il est utile de s'occuper, comme notions substantielles positives. Le Dr Salomon, dans son extension de la théorie de Charles sur les caractéristiques des surfaces, M. Clifford, dans une question de probabilité, et moi-même dans ma théorie des partitions, et aussi dans ma note sur la projection Barycentrique, dans le *Philosophical Magazine*, nous avons tous senti et prouvé l'utilité pratique de traiter l'espace à quatre dimensions comme si c'était un espace concevable. De plus, il faut se souvenir que toute représentation en perspective d'un espace figuré à quatre dimensions, est une figure dans l'espace réel, et que les propriétés des figures peuvent être étudiées, dans une large mesure, sinon complètement, d'après leurs représentations en perspective. • *Nature*, vol. I, p. 237 seq. — C'est moi qui ai souligné les passages en italiques ci-dessus.

1. Mathématicien italien qui a recherché les propriétés des surfaces pseudo-sphériques, lesquelles se distinguent des autres surfaces de courbure constante

théorie juste et complète du parallélisme. Grâce à une foi entière dans la force de ces positions imprenables, les sectateurs de l'Église de la géométrie transcendente ne craignant pas d'annoncer qu'avec l'apparition des « Recherches géométriques » de Lobatschewsky ¹, une ère nouvelle s'est levée sur le monde mathématique, et que, dans la splendeur de cette ère, le corps entier des vérités géométriques sera ramené à la simplicité et à l'ordre, à peu près comme la théorie des mouvements célestes fut simplifiée et éclaircie par la grande idée de Copernic. « Ce que Vesale fut à Galien, s'écrie le professeur Clifford ², ce que Copernic fut à Ptolémée, Lobatschewsky le fut à Euclide. »

Le débat entre les disciples de la nouvelle école transcendente ou pangéométrique et les adhérents de l'ancienne foi géométrique présente un trait qui ne peut manquer de frapper de quelque étonnement l'observateur ordinaire. Les disciples de la nouvelle école se placent fermement sur le terrain empirique ; leur toute première proposition c'est que toutes les vérités géométriques sont d'origine empirique, que tout ce que nous savons de l'espace ou de ses propriétés est ce que nous en apprend l'expérience sensible. Cette proposition, — et la négation de l'origine *a priori* des axiomes géométriques qui en résulte, — sont développées avec insistance et par Riemann et par Helmholtz. Cependant, sur ce fondement, ils construisent une théorie qui nous transporte jusqu'aux régions les plus éloignées du transcendentalisme, jusqu'aux royaumes d'un espace métagéométrique dans lequel toutes les ressources ordinaires de l'imagination et de la conception sont insuffisantes, dans lequel les faits de l'expérience journalière aussi bien que leurs relations naturelles sont complètement perdus de vue.

D'un autre côté, les plus illustres champions de la vieille croyance géométrique, en défendant les données familières de

en ce qu'elles admettent une sorte de parallélisme, au sens transcendental, entre leurs « lignes les plus droites ». Une référence aux écrits de Beltrami et une courte exposition de leur contenu se trouve dans le traité de Helmholtz sur *L'origine et le sens des Axiomes Géométriques*, Mind, vol. I, p. 306.

1. *Geometrische Untersuchungen zur Theorie der Parallellinien*, von Nicolaus Lobatschewsky. Berlin, Fincke'sche Buchhandlung, 1840.

2. *Philosophy of the Pure Sciences*, W.-K. Clifford's, *Lectures and Essays*, vol. I, p. 297.

l'expérience sensible et en combattant les divagations de la géométrie transcendente, invoquent l'origine non empirique de notre idée d'espace et de ses relations essentielles.

Les pangéomètres érigent donc un édifice transcendantal sur des fondements empiriques, tandis que les géomètres ordinaires construisent un système conforme aux données de l'expérience sur des fondements transcendants. Cependant, cette circonstance, si étrange qu'elle paraisse à première vue, ne surprendra guère quiconque a médité l'histoire des théories de la connaissance, ou quiconque a lu et compris les pages qui précèdent. Il n'est pas rare de constater que les spéculations ontologiques, — qu'elles apparaissent sous forme de théories physiques ou de théories métaphysiques, — renversent, à la fin, non seulement les faits qu'elles sont destinées à expliquer, mais le point d'appui même sur lequel elles sont censées reposer.

Après avoir indiqué, en général, le sens et le but de la théorie transcendente de l'espace, je passe maintenant à l'examen des prémisses sur lesquelles elle repose et des arguments par lesquels on cherche à la soutenir. Ici on rencontre, dès le début, une supposition qui est évidemment la base de toute la théorie : c'est que l'espace est une chose réelle, non seulement un objet d'expérience, mais un objet indépendant de sensation directe, dont les propriétés peuvent être connues à l'aide des instruments ordinaires de recherche physique et astronomique, — dont le degré de courbure, par exemple, doit être déterminé au moyen du télescope. Cette supposition est explicitement formulée par chacun des trois principaux auteurs qui ont exposé la théorie en question. « Le seul moyen à notre disposition, dit Lobatschewsky ¹, pour déterminer l'exactitude des propositions (calculs) de la géométrie ordinaire, c'est de faire appel aux observations astronomiques. » Dans le même sens, Riemann ² : « Si nous supposons que les corps existent indépendamment de leur position dans l'espace, la mesure de la courbure (de l'espace) est constante partout ; *et alors il résulte des mesures astronomiques* qu'elle n'est pas différente de zéro. » Helmholtz dit

1. *Geometrische Untersuchungen*, etc., p. 60.

2. Ueber die Hypothesen, etc., *Abhandl. der kgl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, vol. XIII, p. 148.

dans le même sens¹ : « Tous les systèmes de mesure pratique qui ont été employés pour les angles de grands triangles rectilignes, et spécialement tous les systèmes de mesure astronomique qui font égale à zéro la parallaxe des étoiles fixes dont la distance n'est pas mesurable (dans l'espace pseudo-sphérique, la parallaxe même de points infiniment éloignés serait positive), confirment empiriquement l'axiome des parallèles, et montrent que, jusqu'à présent, la mesure de la courbure de notre espace n'est pas sensiblement distincte de zéro. *Il reste cependant une question, comme l'a fait observer Riemann : le résultat ne pourrait-il pas être différent, si nous trouvions le moyen d'employer d'autres lignes fondamentales que nos lignes limitées, dont la plus grande est le grand axe de l'orbite de la terre.* »

Cette vue sur la nature de l'espace, et sur l'origine des idées que nous en avons, marque évidemment que l'on dépasse sans hésiter les dernières limites de l'ancien domaine sensualiste. Néanmoins, elle trouve, au fond, un appui dans les ouvrages d'un penseur anglais plusieurs fois cité dans ce livre, J. Stuart Mill, qui est regardé, surtout en Europe, comme l'écrivain le plus habile à exposer et à défendre les doctrines du sensualisme, du moins en ce qui concerne le sujet qui nous occupe². En résumé, ces doctrines se ramènent à ceci : L'idée ou la notion d'espace dérive directement de l'expérience sensible ; les propriétés de l'espace doivent être déterminées par l'observation ou l'expérience ; les vérités fondamentales de la géométrie, comme les autres vérités de la science physique, ont l'induction pour origine et pour

1. « On the Origin and Meaning of Geometrical Axioms », *Mind*, vol. I, p. 314.

2. Je ne veux pas dire que Riemann et Helmholtz eux-mêmes se rapportent directement à Mill. Mais il y a peu de physiciens et de mathématiciens allemands qui n'aient étudié avec soin la *Logique* de Mill, particulièrement depuis l'apparition de la traduction de Schiel et les éloges exagérés de Liebig ; et ceci est tout à fait visible dans les écrits des pangéomètres. L'intérêt avec lequel chaque nouvelle édition de la *Logique* de Mill a été reçue par les hommes de science de partout est due surtout, sans doute, à ce qu'il se reporte fréquemment aux méthodes et aux résultats de la science. Le fait est que Mill a été, pendant une série d'années, le logicien et le métaphysicien officiel des naturalistes et mathématiciens du continent européen, et le respect qu'ont pour lui les savants contemporains ressemble à celui qu'Aristote possédait parmi les scolastiques du moyen-âge

fondement; enfin la certitude des théorèmes géométriques, quoique différente peut-être en degré, ne diffère pas en nature de la certitude qui s'attache aux assertions générales touchant les faits physiques.

Les dogmes particuliers de la pangéométrie étant fondés en grande partie sur la théorie sensualiste générale, il convient d'examiner brièvement cette théorie, avant de procéder à la discussion des dogmes pangéométriques eux-mêmes. Je choisirai comme base l'exposé de la théorie donné dans le *Système de Logique* de J. S. Mill. Le chapitre v du second livre « sur la Démonstration et les Vérités Nécessaires », contient la formule élaborée des vues de l'auteur relativement au principe et à la méthode des sciences géométriques.

« Le fondement de toutes les sciences, dit Mill¹, même déductives ou démonstratives, c'est l'Induction; chaque pas de tout raisonnement, même en géométrie, est un acte d'induction... Le caractère de nécessité assigné aux vérités des mathématiques, et même (avec certaines réserves qui seront faites ci-après), la certitude particulière qu'on leur attribue, sont une illusion, laquelle ne se maintient qu'en supposant que ces vérités se rapportent à des objets et à des propriétés d'objets purement imaginaires. Il est admis que les conclusions de la géométrie sont déduites, du moins en partie, de ce qu'on appelle les Définitions, et que ces définitions sont des descriptions rigoureusement exactes des objets dont s'occupe cette science. Or, nous avons fait voir que, d'une définition, comme telle, on ne peut tirer aucune proposition, à moins qu'elle ne se rapporte à la signification d'un mot; ce qu'on déduit en apparence d'une définition, résulte en réalité de la supposition implicite qu'il existe une chose réelle correspondant à cette définition. Or, cette supposition n'est pas strictement vraie; il n'y a pas de choses réelles exactement conformes aux définitions géométriques; il n'y a pas de points sans étendue, pas de lignes sans largeur ni parfaitement droites, pas de cercles à rayons exactement égaux ni de carrés à angles parfaitement droits. On dira peut-être que la supposition s'applique, non à l'existence actuelle, mais seulement à l'existence possible de telles choses. Je réponds

1. *Système de Logique* (8^e éd. anglaise), p. 168 seq. — Traduit en français.

que, d'après tout ce que nous pensons sur les règles de possibilité des choses, elles ne sont pas même possibles. Leur existence, nous semblerait tout à fait incompatible avec la constitution physique de notre planète, sinon même de l'univers entier. Pour sortir de cette difficulté, et sauver en même temps le crédit de l'hypothèse des vérités nécessaires, on a coutume de dire que les points, lignes, cercles et carrés de la géométrie existent seulement dans nos conceptions et font partie de notre esprit, lequel esprit, travaillant sur ses propres matériaux, construit une science *a priori*, dont l'évidence est purement mentale et n'a rien du tout à faire avec l'expérience externe. Quelque considérables que soient les autorités en faveur de cette doctrine, elle me semble psychologiquement inexacte. Les points, les lignes, les cercles que chacun a dans l'esprit sont, il me semble, de simples copies des points, lignes, cercles et carrés qu'il a connus par l'expérience. Notre idée d'un point est simplement l'idée du *minimum visible*, la plus petite portion de surface que nous puissions voir. Une ligne, telle que la définissent les géomètres, est tout à fait inconcevable. Nous pouvons parler d'une ligne comme si elle n'avait pas de largeur, parce que nous possédons une faculté par laquelle, lorsqu'une perception est présente à nos sens ou une idée à notre entendement, nous pouvons *faire attention* à une partie seulement de l'idée ou de la perception. Mais il nous est impossible de *concevoir* une ligne sans largeur, de nous faire mentalement une image d'une telle ligne. Toutes les lignes représentées dans notre esprit sont des lignes ayant de la largeur. Si quelqu'un en doute, nous le renvoyons à sa propre expérience. Je doute fort que celui qui se figure concevoir ce qu'on appelle une ligne mathématique ait pour cela le témoignage de sa conscience; je soupçonnerais plutôt que, s'il croit à la ligne mathématique, c'est parce qu'il suppose cette conception indispensable pour que les mathématiques existent comme science : supposition dont il ne sera pas difficile de montrer la complète inanité.

» Donc, puisqu'il n'y a, ni dans la nature, ni dans l'esprit humain, aucun objet exactement conforme aux définitions de la géométrie, et que, d'ailleurs, on ne peut admettre que cette science ait pour objet des non-entités, il ne reste qu'une chose à dire : c'est que la géométrie a pour objet les lignes, les an-

gles et les figures tels qu'ils existent ; et que les définitions doivent être considérées comme nos premières et nos plus évidentes généralisations relatives à ces objets naturels. Ces généralisations, *en tant que* généralisations, sont parfaitement exactes. L'égalité de tous les rayons est vraie de tous les cercles autant qu'elle est vraie d'un cercle, mais elle n'est complètement vraie d'aucun ; elle ne l'est que de très près, mais elle l'est cependant d'assez près que la supposition de sa vérité absolue n'entraîne dans la pratique aucune erreur sensible. Lorsqu'on étend ces inductions ou leurs conséquences à des cas où l'erreur serait appréciable, — à des lignes d'une largeur ou d'une épaisseur perceptibles, à des parallèles qui dévient sensiblement de l'équidistance et autres semblables, — on corrige ses conclusions en y combinant de nouvelles propositions relatives aux erreurs. C'est absolument de même qu'on agit pour les propositions relatives aux propriétés physiques et chimiques, s'il arrive que ces propriétés introduisent quelques modifications dans les faits : ce qui a lieu souvent, même pour la figure et la grandeur, par exemple, dans les cas de dilatation des corps par la chaleur. Tant qu'il n'y a aucune nécessité pratique de tenir compte des autres propriétés de l'objet que de ses propriétés mathématiques, ou des irrégularités de ces propriétés dans la nature, on peut négliger ces autres propriétés et raisonner comme si elles n'existaient pas. En conséquence, nous déclarons formellement, dans les définitions, que nous entendons procéder de cette manière. Mais de ce que nous bornons volontairement notre attention à un certain nombre des propriétés d'un objet, ce serait une erreur de supposer que nous concevons l'objet dépouillé de ses autres propriétés. Nous pensons toujours aux objets mêmes, tels que nous les avons vus et touchés, et avec toutes les propriétés qui leur appartiennent naturellement ; mais, pour la convenance scientifique, nous les feignons dépouillés de toutes propriétés, excepté celles qui sont essentielles à notre recherche et en vue desquelles nous voulons les considérer.

» Cette exactitude toute particulière qu'on attribue aux premiers principes de la géométrie est donc illusoire. Les assertions sur lesquelles les raisonnements se fondent n'y correspondent pas plus exactement aux faits que dans les autres

sciences ; mais nous supposons qu'elles y correspondent, pour pouvoir tirer les conséquences qui découlent de la supposition. Je trouve donc exacte en substance l'opinion de Dugald-Stewart, que la géométrie est fondée sur des hypothèses ; que c'est à cela seul qu'elle doit la certitude particulière qui la distingue, et que, dans toute science, on peut, en raisonnant sur des hypothèses, obtenir un ensemble de conclusions aussi certaines que celles de la géométrie, c'est-à-dire aussi rigoureusement concordantes avec les hypothèses, et forçant aussi irrésistiblement l'assentiment, à condition que les hypothèses soient vraies. »

J'ai cité ce passage de la *Logique* de Mill, tout au long, non-seulement parce que c'est l'exposé le mieux élaboré et le plus suivi des théories sensualistes sur le caractère des vérités nécessaires, et spécialement des vérités de la géométrie, mais aussi parce que cet exposé présente quelques particularités dignes d'attention. Une de ces particularités, c'est la concession que l'esprit a la faculté d'abstraction, qu'il peut former des généralisations et s'en servir pour raisonner, généralisations qui, « *en tant que* généralisations sont parfaitement exactes ». L'incompatibilité de cette doctrine avec la prétention que « les points, lignes, cercles et carrés que chacun a dans l'esprit sont de simples copies des points, lignes, cercles et carrés qu'il connaît d'expérience » est évidente. Cette incompatibilité n'a pas échappé à d'autres promoteurs de la doctrine empirique ou sensualiste, comme on le voit, par exemple, dans les écrits de M. Buckle : il n'hésite pas à tirer les vraies conclusions (devant lesquelles Mill lui-même semble reculer) des prémisses de Mill. Non-seulement Buckle affirme hardiment qu'il n'y a pas de ligne sans largeur (il oublie, chose étrange, l'épaisseur), mais aussi que l'omission de cette largeur fausse tous les résultats du raisonnements géométrique ; il accorde seulement comme consolation, que l'erreur, après tout, n'est pas très considérable. « Cependant, dit-il ¹, comme la largeur des lignes les plus fines est si petite qu'elle ne peut être mesurée, autrement qu'avec un microscope, il en résulte que l'hypothèse de lignes sans largeur est presque

¹ *History of Civilization in England*, vol. II, p. 342 (Appleton's American Edition).

vraie ; à ce point que nos sens, sans secours étranger ne pourraient jamais en découvrir l'erreur. Autrefois, jusqu'à l'invention du micromètre au xviii^e siècle, — il était tout à fait impossible de la démontrer. Les conclusions des géomètres approchent donc de la vérité à un tel point que nous avons le droit de les accepter comme vraies. L'erreur est trop petite pour être perçue. Mais il me paraît certain qu'il y a une erreur ; il me paraît certain que, dès qu'il y a une réserve à faire dans les prémisses, quelque chose doit manquer à la conclusion. Dans tous les cas de ce genre, le champ de la recherche n'a pas été complètement exploré ; une partie des faits préliminaires étant supprimés, il faut admettre, je pense, que la vérité complète est inaccessible, et qu'il n'y a pas de problème de géométrie complètement résolu.»

Buckle était-il capable de penser une ligne au sens de limite de deux surfaces, et, dans son opinion, une telle limite a-t-elle une largeur — c'est-à-dire est-elle elle-même une surface de sorte que nous remontons de limite en limite, *ad infinitum*, — il ne nous le dit pas. Il ne dit pas non plus si, oui ou non, étant donné que la largeur d'une ligne dépend de la matière dont elle est faite ou sur laquelle elle est tracée, il devrait y avoir une géométrie de carton, une géométrie de bois, une géométrie de pierre, et ainsi de suite, comme autant de sciences distinctes.

Cependant, pour rendre justice à Mill et au sujet en question, nous allons nous en tenir à l'exposé de Mill. Revenons donc à cet exposé. Une question se pose : Que veut-il dire par ces mots, qu'aucun des éléments de l'espace n'existe en fait comme on les considère en géométrie, — par exemple, qu'il n'existe pas de lignes parfaitement droites ? Le seul sens possible est qu'aucune des lignes appelées droites, dont nous avons une connaissance *expérimentale*, n'est identique aux lignes droites dont nous avons une *autre* connaissance, — qu'elles ne sont pas conformes au type de ligne droite qui est dans l'esprit. Mais Mill affirme que « les lignes, etc., que chacun a dans l'esprit, sont de simples copies des lignes qu'il connaît d'expérience ». Il n'y a donc pas de type avec lequel les lignes qui se présentent dans l'expérience puissent être comparées, et dont on puisse montrer qu'elles diffèrent. Ainsi la théorie de Mill contredit le premier fait qu'il apporte pour

la défendre¹. Ce n'est pas là une critique captieuse. C'est simplement montrer que les prémisses d'où sont tirées les conclusions de Mill sont complètement dénuées de sens. Le fondement de sa théorie croule tout entier dès qu'on le touche. En continuant l'examen, on trouve que le sens des faits avancés est entièrement faussé. Le sens véritable de l'assertion de Stuart Mill diffère tout à fait de celui qu'il lui attribue. La vérité cachée au fond de cette assertion c'est que nous n'avons aucune connaissance expérimentale, au sens de Mill, des lignes, cercles ou carrés. Nous connaissons expérimentalement des tiges, des cordes, des fils, des rainures, que nous appelons droits, des corps sphériques et cubiques, avec des sections ou des faces circulaires ou carrées ; mais notre connaissance des points, lignes, surfaces et solides géométriques ne s'obtient que par abstraction. Rien n'est plus clair ni plus facilement démontrable que ceci : les éléments de la géométrie — les fondements sur lesquels la géométrie repose — ne peuvent avoir été obtenus par induction ; *a fortiori*, il ne peut pas être vrai, comme Mill le prétend, que « chaque pas dans les raisonnements de la géométrie est un acte d'induction ». L'induction est une accumulation d'exemples dans lesquels le même élément ou trait se trouve toujours accompagné d'autres éléments ou traits. Mais personne n'a jamais vu deux corps dont les contours, bien qu'appelés droits, ne se trouvent pas brisés à divers degrés, quand on les examine avec des instruments suffisamment grossissants. L'expérience ne fournit pas deux objets présentant ce caractère de la ligne droite au même degré. Encore moins a-t-on jamais vu un grand nombre de corps dont les limites fussent exactement coïncidentes. La même chose est d'ailleurs vraie, *mutatis mutandis*, des points, courbes, surfaces et solides. La diver-

1. Qu'un penseur aussi pénétrant que J. S. Mill n'ait pas senti les nombreuses incohérences et absurdités dont sa *Logique* et plusieurs de ses autres ouvrages sont remplis, c'est ce qu'on ne peut expliquer que par ce fait qu'il adopta sa théorie de la connaissance sur la foi de son père, comme un héritage sacré. Celui-ci, à son tour, la tenait des nominalistes et sensualistes français et anglais des dix-septième et dix-huitième siècles. Les doctrines de ces sensualistes étaient nécessairement grossières, parce qu'elles prirent naissance à une époque où la psychologie rationnelle était dans l'enfance, et où on n'avait pas encore pensé à la psychologie comparée ; elles étaient exagérées parce qu'elles avaient été produites par les adversaires d'un réalisme également exagéré.

gence entre leurs figures, aussi bien qu'entre leurs grandeurs, devient plus apparente à mesure qu'on les regarde avec un grossissement plus fort ; et leurs vraies formes sont impossibles à découvrir par aucun pouvoir grossissant à notre portée. La vérité est que nous ne voyons jamais, nous ne sommes jamais en présence d'un fait géométrique vrai et complet. C'est donc un simple non-sens de dire, avec Mill, que les points, lignes, surfaces, solides, etc. dont s'occupe la géométrie, et sur lesquels il est possible de faire des déductions valides, sont des points, lignes, surfaces ou solides réels (c'est-à-dire physiques et non imaginaires), et de prétendre que les points, lignes, surfaces ou solides conçus dans l'esprit en sont des copies. Il est vrai que les éléments géométriques ne sont pas imaginaires puisqu'ils se rapportent à des faits réels ; mais, ils ne sont pas non plus, en aucun sens acceptable, *hypothétiques*, comme le prétend Dugald Stewart ; ils sont *conceptuels*, résultats d'abstraction. S'il en était autrement, le raisonnement géométrique déductif, et même, en réalité, toute autre espèce de raisonnement digne de ce nom, deviendrait complètement impossible. Tout raisonnement déductif dépend de la faculté d'abstraction ; cette vérité s'applique, non seulement à la géométrie et aux mathématiques en général, mais à toutes les sciences. Cela tient à deux raisons : D'abord, aucune chose physique (ou événement historique) ne nous est jamais connue expérimentalement avec toutes ses propriétés, relations ou incidents ; la sensation et la perception ne fournissent jamais à l'esprit un fait complet. En second lieu, comme je l'ai montré plus haut, en s'occupant de ce qu'on appelle les faits, obtenus au moyen de l'expérience sensible, l'esprit se borne à certaines relations définies qu'il sépare ou abstrait des autres relations. Dans la marche de la pensée discursive, l'intellect n'a jamais devant lui ni des objets sensibles, ni la somme complète de relations qui constituent leurs images ou représentations mentales, mais seulement quelque relation, ou classe de relations simples. Il opère sur des *lignes* abstraites, et la synthèse finale des résultats ne donne jamais rien de plus que les contours des objets représentés. Pendant toutes ces opérations, l'esprit sait parfaitement que ni aucun anneau de la chaîne d'abstraction, ni le groupe de résultats abstraits que nous appelons un

concept — (au sens étroit de collection d'attributs représentant un objet d'intuition ou de sensation) — n'est une copie ou une contre-partie exacte de l'objet représenté. Il a toujours conscience que, pour manifester une vraie conformité des concepts ou de quelqu'un de leurs attributs constitutifs avec ces formes de la réalité objective, le groupe de relations contenues dans ces concepts devrait être complété par un nombre indéterminé d'autres relations qui n'ont pas été saisies, et peut-être ne peuvent pas l'être. Mais ceci n'affecte en aucune façon la validité de l'opération intellectuelle. Le mathématicien, quand il détermine les propriétés d'une section conique, sait très bien qu'il ne rencontrera jamais un corps dont le contour géométrique soit un exemple exact de la loi de la constance du rapport entre les distances d'un quelconque de ses points à un point fixe, avec une ligne droite donnée, et qu'il n'y a dans la nature aucune trajectoire coïncidant strictement avec une telle courbe. Mais cette connaissance ne trouble pas le moins du monde sa confiance dans la validité parfait de son raisonnement. Quand il veut appliquer les résultats de ce raisonnement à un fait naturel, il le complète, aussi bien que possible, par les résultats d'autres raisonnements fondés sur des relations connues du même fait; il approche ainsi du fait autant que possible, sans s'effrayer de cette réflexion constamment vraie, qu'il ne réussira jamais à se mettre en présence du fait complet avec toutes ses relations.

Il est clair que la conformité des résultats du raisonnement abstrait ou conceptuel avec les données de l'expérience est en raison directe du degré d'indépendance des relations dont il s'agit, à l'égard des autres relations qui constituent les conditions d'existence réelle de l'objet représenté dans l'opération de la pensée. De là vient la prééminence de la géométrie parmi les sciences physiques. Les divers phénomènes, dont s'occupent les sciences physiques, ont entre eux une étroite corrélation; les propriétés thermiques, électriques, magnétiques, optiques et chimiques d'un corps se déterminent mutuellement les unes les autres de diverses manières. Si la nature et le degré de cette dépendance mutuelle étaient exactement connus et pouvaient être mis à la portée d'une analyse conceptuelle parfaite, ces sciences deviendraient déductives tout aussi bien que la géométrie. Toutes les sciences physiques

travaillent constamment à progresser dans cette direction ; mais le progrès est assez lent pour qu'il y ait peu d'espoir que le but, ici indiqué, soit jamais atteint. Une des raisons de ce fait, c'est que le nombre des propriétés nouvellement découvertes se multiplie — aussi vite, sinon plus vite — au fur et à mesure que la nature et le degré de dépendance mutuelle entre les propriétés déjà connues sont mises en lumière. Et la difficulté de déterminer la dépendance mutuelle en question augmente d'après une proportion géométrique tandis que le nombre des nouvelles propriétés augmente d'après une proportion arithmétique.

Les réflexions précédentes suffisent bien, à mon avis, pour montrer que les doctrines sensualistes sur l'espace et sur la nature et le fondement de la vérité géométrique sont insoutenables, au moins sous la forme dans laquelle elles étaient proposées par M. Mill. Mais elles ne détruisent en aucune manière cette proposition générale que toute notre connaissance du monde objectif est dérivée de l'expérience. Cette proposition me paraît indéniable, et elle a, sans doute, l'assentiment explicite, ou enveloppé de quelque manière, de toute personne de bon sens à l'heure présente, toutes les controverses à ce sujet étant des querelles de mots. Mais les sensualistes, et spécialement, comme je l'ai déjà montré, les fondateurs et les défenseurs de la géométrie transcendente, avancent une thèse qui doit être soigneusement distinguée de la proposition que je viens de formuler. Ils soutiennent que l'espace n'est pas seulement objectivement réel, mais qu'il est un objet de sensation direct et indépendant dont les propriétés doivent être établies empiriquement comme celles de toute autre chose physique. Cette assertion combat une assertion contraire, faite par les antagonistes du transcendantalisme géométrique ; c'est que l'espace, comme le temps, n'est pas un objet indépendant de sensation, mais, — comme Kant l'a montré ou est supposé l'avoir montré, — une pure forme de l'intuition, un état ou une condition de l'esprit, existant à titre indépendant, avant toute expérience sensible. Si le débat continue entre les champions de la nouvelle doctrine et leurs adversaires, c'est grâce à la croyance, commune aux deux partis en lutte, que ces doctrines sont rigoureusement alternatives, et qu'il n'y en a pas d'autre admissible ou

possible. Mettons donc ces deux thèses contraires à l'épreuve des faits de connaissance sur lesquels il n'y a pas de contestation, ou qui évidemment ne peuvent pas être contestés par des arguments rationnels.

Discutons d'abord la thèse de Riemann et d'Helmholtz : si l'espace est un objet physiquement réel, il n'est certainement pas en dehors des autres objets physiques, ni coordonné avec eux. Quand nous disons que toutes choses sont dans l'espace, nous ne voulons pas dire qu'elles y sont contenues comme l'eau est contenue dans un vase ; nous voulons dire qu'il n'y a pas de chose objectivement réelle qui ne soit étendue, ou, selon l'expression usuelle, que l'étendue est une propriété primaire de toutes les variétés de l'existence objective. Ce fait est si évident qu'il amena Descartes à considérer l'étendue comme formant à elle seule l'essence de la réalité objective. De quelle manière, et par quels moyens distinguons-nous donc l'espace de ce que l'on appelle ordinairement les choses physiques ? Assurément ce n'est pas, au moins directement, par la sensation. Sans doute, des actes de sensation différents peuvent manifester des propriétés différentes du même objet, et ces propriétés peuvent aussi être dissociées. Mais aucun acte de sensation ne dissocie l'étendue d'un corps de toutes ses autres propriétés, et ne manifeste la propriété de l'étendue seule. Cependant, les sensualistes prétendent — ils empiètent ici sur le terrain de leurs adversaires, les idéalistes Kantiens — que, quoiqu'il n'y ait pas d'objets physiques sans étendue et que l'étendue soit en un sens une propriété commune à tous les objets physiques, néanmoins ces objets ne remplissent pas tout l'espace, et qu'il y a de l'espace vide entre eux. En admettant que cette assertion soit vraie, elle ne vient pas en aide aux sensualistes : car les actes de sensation ne sont possibles qu'avec des différences et changements objectifs ; nous avons une sensation directe de ce qu'on appelle ordinairement les qualités physiques différentes et variables, mais non de ce qui est absolument homogène et invariable. Ici intervient la loi de Hobbes : *Sentire semper idem et non sentire ad idem recidunt*. C'est précisément le fait de son homogénéité et de son immutabilité, joint à celui de sa présence invariable dans tous les objets physiques, qui distingue l'étendue de toutes les autres propriétés caractéri-

sant une chose réelle, et qui permet aux sensualistes de parler de l'espace. Si cette distinction pouvait être effacée — si la barrière, cognitive ou conceptuelle, qui sépare des états de conscience représentant l'espace, les sensations produites par l'action physique, était un jour brisée — il n'y aurait plus aucune raison de distinguer entre les « propriétés » de l'espace et les propriétés de la matière dans une quelconque de ses variétés. Nous serions contraints de dire que la seule forme ou variété d'existence objective est l'espace ou la matière (ce ne serait qu'une question de nomenclature) et que toutes les propriétés que nous attribuons maintenant à la matière, sont vraiment et effectivement des propriétés de l'espace.

On doit s'étonner que tout cela ait échappé à l'attention de Riemann et de Helmholtz, quand on examine l'hypothèse faite par tous deux pour rendre compte de la prétendue nécessité d'attribuer à l'espace une mesure de courbure constante, et de limiter ainsi à trois, le nombre des formes de l'espace admissibles, d'après leur formule : savoir l'espace sphérique, avec une courbe positive, l'espace pseudo-sphérique avec une courbe négative, enfin, l'espace plat ou homaloïdal avec une courbe égale à zéro¹. Je fais allusion à cette hypothèse que les corps, dans le langage déjà cité, de Riemann « existent indépendamment de leur position dans l'espace », ce qui d'ailleurs signifie au moins qu'ils sont différents de l'espace, sinon que leur constitution physique en est tout à fait indépendante. En s'en tenant à cette hypothèse, il ne peut y avoir aucune raison valide, fondée sur ou conciliable avec les prémisses de la théorie transcendente, pour que l'espace ne puisse pas être essentiellement paraboloidal, ou hyperboloidal, ou polyhédral, ou de toute autre forme essentielle, que pourra inventer l'imagination féconde de la première intelligence non homaloïdale venue.

Ceci m'amène à cette allégation des transcendentalistes, que les propriétés de l'espace, telles que le degré et la forme de sa courbure, doivent être déterminées par l'expérience. Comment faire une telle détermination? Supposons qu'un astro-

1. Felix Klein (Ueber die nicht euklidische Geometrie, *Mathematische Annalen*, vol. IV, p. 577) appelle ces sortes d'espace *elliptique, parabolique et hyperbolique*,

nome, à des intervalles convenables, dirige son télescope vers quelque étoile fixe — dont il sut par quelque manière (par exemple, par des données spectroscopiques) que la distance à la terre est beaucoup plus grande que celle d'*Arcturus*, — afin d'en déterminer la parallaxe. Supposons qu'il trouve cette parallaxe sensiblement supérieure à celle des étoiles moins éloignées, — en d'autres termes, supposons qu'il trouve que l'angle d'intersection entre les lignes de sa vision soit différent de celui qui est requis par les lois et faits connus de l'astronomie ou de l'optique. Quelle serait sa conclusion ? Il n'est pas difficile de prévoir la réponse à cette question, car le cas supposé n'est pas sans précédent dans l'histoire de l'astronomie. Des déplacements dans les lignes de la vision ont été à plusieurs reprises observés par les astronomes, et ils étaient incapables d'en rendre compte par les faits et lois naturels dont ils avaient connaissance. Dans la première partie du dernier siècle, Bradley (avec l'aide de Molyneux) fit une série d'observations télescopiques de l'étoile γ *Draconis* : il voulait déterminer son déplacement apparent dû au mouvement orbital de la terre, afin de découvrir la parallaxe annuelle des étoiles fixes, — progrès fort désirable au temps de Bradley à cause de l'objection faite au système de Copernic et fondée sur la prétendue absence d'une telle parallaxe. A sa surprise, il trouva un déplacement différent en direction et beaucoup plus grand en quantité que celui auquel il s'attendait. Il fallait expliquer cette anomalie ; et Bradley ne connaissait pas de cause physique à laquelle il pût l'assigner. Il pensa quelque temps à la nutation, puis à la réfraction ; mais il reconnut bientôt que ni l'une ni l'autre n'expliquait le fait. Finalement, il fut conduit, par une étude attentive des variations de direction et d'étendue du déplacement, à chercher une solution du mystère dans la composition entre la vitesse de la lumière et celle du mouvement orbital de la terre : il découvrit ainsi ce que l'on connaît maintenant sous le nom d'aberration de la lumière. Cependant, au milieu de toutes ces perplexités, il ne semble jamais lui être venu à l'esprit, que l'anomalie pouvait être le résultat d'une courbure constitutionnelle de l'espace. On peut affirmer avec confiance qu'aucun astronome contemporain ne songerait davantage à expliquer cette anomalie de la parallaxe, par une

pseudo-sphéricité de l'espace. En effet, à défaut d'autre objection, l'astronome ne manquerait pas au moins d'opposer à toute suggestion de ce genre, qu'une courbure inhérente de l'espace présuppose des différences entre ses diverses parties, — de l'hétérogénéité dans sa constitution interne, — et que, par conséquent, l'hypothèse suggérée ne contenait rien moins que l'attribution à l'espace de ces mêmes propriétés par l'absence desquelles il se distingue de la matière.

La théorie des transcendentalistes géométriques est ainsi invalidée par l'absurdité de son hypothèse fondamentale. L'espace n'est pas, et ne peut pas être un objet de sensation. Pour lui attribuer des relations et des intersections sensibles, analogues à celles que donne la sensation, il faudrait sans supposer des diversités entre ses parties constituantes : supposition dont la négation est la base de toute notion ou concept de l'espace, quelle que soit la doctrine logique ou psychologique à laquelle cette notion est rapportée. Sommes-nous donc conduits à la supposition contraire des idéalistes Kantiens, que l'espace est une forme purement subjective de l'intuition, existant dans l'esprit indépendamment de, et antérieurement à tous les actes de sensation, — à la doctrine des adversaires métaphysiciens et mathématiciens du transcendentalisme géométrique? Voyons sur quels arguments cette doctrine s'appuie.

Les idéalistes Kantiens affirment que l'idée d'espace est, non-seulement un élément invariable de tout acte de sensation, mais une condition préjudicielle de la sensation. Avant de pouvoir rapporter aucune impression subjective à une cause objective, avant de parler de l'existence de choses ou de phénomènes objectivement réels, il faut que la base de ce rapport, — c'est-à-dire la relation, non-seulement entre le Dedans et le Dehors mais aussi entre deux éléments, du Dehors, dont l'intersection produit la sensation, — soit déjà présente à l'esprit. La sensation, dit-on, est sensation d'objets; elle est essentiellement un passage d'une affection ou sentiment subjectif à une réalité objective. Où est le fondement de ce passage? Il n'est pas, prétendent les Kantiens, dans le monde des objets; car les objets ne sont atteints, et n'existent dans l'intuition et la sensation, que grâce à ce passage. Il doit donc être dans le sujet, dans l'esprit; et il doit

y être présent avant l'acte de sensation. On voit, en outre (prétend-on), qu'il en est ainsi, par ce fait que l'idée d'espace est absolument indestructible. Nous pouvons vider mentalement l'espace de son contenu sensible; nous pouvons « supprimer par la pensée » tout ce qui est un objet de sensation; nous ne pouvons pas « supprimer par la pensée » l'espace lui-même. L'espace est une partie intégrante de tous les états de conscience quelconques.

L'exposé qui précède est une formule juste et suffisamment complète de la doctrine kantienne. Cette doctrine a un trait commun avec celle des sensualistes, trait dont j'ai déjà parlé plus haut, c'est l'hypothèse que l'espace existe, soit comme objet de sensation, soit comme forme d'intuition, — *en tant que fait indépendant*, et que, par suite, il est susceptible d'être appréhendé *par lui-même*, soit objectivement, soit subjectivement. J'ai déjà montré que cette hypothèse dans le système sensualiste, n'est pas fondée. Après examen attentif, on la trouve aussi peu fondée au sens idéaliste. Il n'est pas vrai que nous puissions mentalement vider l'espace de tout son contenu, et avoir dans l'esprit, ou devant l'esprit, la forme ou l'image de l'espace pur. Au contraire, l'idée de l'espace est invariablement associée dans la conscience avec quelque qualité sensible déterminée. Quand nous essayons de nous mettre l'espace devant l'esprit (ou, comme on dit ordinairement, de le « réaliser ») dans son aspect visuel, il apparaît toujours en synthèse avec une reproduction mentale de quelque sensation de couleur, si faible qu'elle soit. De même, quand nous faisons effort pour le « réaliser » mentalement ou le représenter sous son aspect tactile, il se trouve également inséparable d'une reproduction de quelque forme de pression ou de sensation¹. Sous ce rapport, les arguments de Hume et de Berkeley (qui sont, nécessairement, de simples appels à la conscience) n'ont jamais été combattus avec succès. La dissociation que nous sommes capables, — et contraints, pour le raisonnement discursif, — d'effectuer entre l'« idée » d'étendue et le sentiment ou les sentiments constituant la sensation, n'est pas une dissociation *intuitionnelle*, mais concep-

1. Cf. *Sir William Hamilton's Lectures on Metaphysics*, sect. XXII; Stumpf, *Ueber den psychologischen Ursprung der Raumvorstellungen* (Leipzig, Hirzel, 1873), p. 19.

tuelle. Toutes les fois que nous contemplons une chose objectivement réelle et que nous en raisonnons, nous pouvons, en vertu de la faculté d'abstraction, considérer la propriété de l'étendue, en négligeant complètement les autres qualités sensibles ; mais toutes les fois que nous luttons pour mettre devant l'esprit l'étendue comme réelle, — pour nous former une image mentale de l'étendue ou pour la représenter comme une forme distincte de l'intuition, — nous sommes absolument forcés de la revêtir de, ou de l'associer à quelque donnée de la sensation que nous regardons comme une circonstance ou une réaction d'un processus physique. L'intuition (en employant le mot dans le sens kantien) est une partie intégrante de la sensation ; elle apparaît comme telle, aussi bien dans les données des sens que dans leurs représentations ou reproductions par l'imagination.

Ceci suffit à juger l'argument Kantien que l'espace doit être une forme subjective de l'intuition puisque l'esprit ne peut pas le bannir de la conscience. Une autre remarque simple n'est pas moins fatale à l'idée de présenter l'espace comme une forme subjective *existant antérieurement à tout acte de sensation*, en tant qu'il est le fondement indispensable à la marche par laquelle l'esprit atteint un objet extérieur à lui-même. La réponse naturelle à ceci, c'est que, si l'espace est purement subjectif, il est entièrement *dans* l'esprit, et ne peut point par conséquent être le fondement du passage à ce qui est hors de l'esprit. Cette réflexion est la vraie base de la phase post-Kantienne de l'idéalisme, telle que celle de Fichte, et en ce sens, celle de Schopenhauer. Mais l'argument total, aussi bien que les perplexités idéalistes qu'il a occasionnées, repose sur la vieille supposition ontologique que les choses ou les entités existent indépendamment les unes des autres, et autrement que comme termes de relations. On a suffisamment établi dans les pages précédentes de ce livre que cette thèse n'est pas vraie des choses objectivement réelles ; cela est également faux pour la relation entre le sujet connaissant et son objet. Dans tout acte de connaissance primaire, ce qu'on appelle le phénomène objectif, et sa contre-partie subjective, sont portés à la conscience au même moment, parce que la réalité de chacun des deux dépend de celle de l'autre. Ceci est le grand fait primaire et irréductible de la connaissance, qui

n'en reste pas moins un fait pour avoir été mal interprété par les métaphysiciens de tant de manières différentes, et avoir provoqué une foule de théories absurdes de la connaissance.

Quelle est donc la nature réelle de l'espace, et quelle est la vraie source de la connaissance que nous en avons ? Si les considérations précédentes sont valides et concluantes, cette question n'admet qu'une réponse. L'espace est un concept, un produit d'abstraction. Tous les objets de notre expérience sensible ont ce caractère d'être étendus, joint à beaucoup de qualités différentes et variables attestées par la sensation ; quand nous avons successivement fait abstraction de ces diverses sensations, nous arrivons finalement à l'idée abstraite ou au concept d'une forme d'étendue spatiale. Je dis à dessein *forme d'étendue* et non simplement *étendue* ou *espace*, car c'est le premier terme et non le second qui exprime le *sum-mum genus* de la série d'abstractions ici indiquée. — Si le mot « concept » est employé comme représentant un objet possible d'intuition, une *forme spatialement étendue* est le dernier résultat du processus par lequel un objet ou un phénomène peut être conçu. L'idée abstraite ou concept, en prenant le mot dans son sens large) d'*étendue en général*, ou d'*espace*, est atteinte par une autre série d'abstractions dont j'aurai peut-être à parler plus loin. C'est pour n'avoir pas distingué entre ces idées, appelées concepts, qui ne tiennent pas compte des limites ou des formes, et les véritables *summa genera* de la classification des objets sensibles, qu'on est tombé dans la confusion qui embarrasse de toutes parts la théorie de l'espace transcendantal, comme nous allons le voir.

Les doctrines des idéalistes (ou plutôt des intellectualistes) sur la nature de l'espace, sont donc aussi insoutenables que les doctrines des sensualistes. L'opinion des disciples de Kant et de Schopenhauer — que les enseignements de la géométrie transcendentale peuvent être réfutés en faisant appel à l'« Esthétique transcendentale » de la « Critique de la Raison Pure » — est une pure méprise. L'affirmation que l'espace est simplement une forme subjective de l'intuition, lors même qu'elle serait vraie, ne pourrait à aucun degré ébranler le transcendantaliste géométrique. Il répond simplement au Kantien, que, l'espace est une forme innée ou une condition de l'intellect

déterminant l'appréhension des objets extérieurs dans un certain ordre, ou d'après certaines lois, c'est encore une question de fait que de chercher cet ordre et ces lois. L'espace est-il dans l'esprit ou en dehors de lui ? Est-il plat, sphérique ou pseudo-sphérique ? Ces questions subsistent. Que la forme des lignes et surfaces possibles dans l'espace soit le résultat de sa constitution physique en dehors de l'esprit, ou de la constitution interne de l'esprit lui-même — dans l'un et l'autre cas le fait est le même, quelle qu'en soit la nature. Ceci est en complet accord avec la déclaration spéciale de Kant lui-même dans ses « Notes sur l'Esthétique Transcendentale »¹, où il dit que notre mode d'intuition n'est pas *nécessairement* borné à la constitution particulière de nos esprits, mais qu'il *peut* être partagé par d'autres êtres pensants, « bien que ce soit un point que nous sommes incapables de décider ». De cette déclaration, on ne peut s'empêcher d'inférer que la question : — Quelle est précisément la forme d'intuition d'un intellect donné ? — est simplement une question de fait. Sur ce point, Helmholtz² est indubitablement dans le vrai contre Land, Krause, Becker, et les autres Kantiens.

Nous voici donc arrivés à cette conclusion que l'espace n'est ni un objet physique de sensation, ni une forme innée de l'esprit indépendante de, et antérieure à toute sensation, mais un concept. Nous pouvons maintenant entrer dans une série de considérations analogues à celles que nous avons déjà présentées contre la prétendue déterminabilité expérimentale de la courbure de l'espace ; ces considérations montreront si complètement le vrai caractère de la théorie transcendentale de l'espace qu'on n'en pourra plus raisonnablement discuter la valeur. La première de ces considérations est celle-ci : si les doctrines des transcendentalistes sont fondées en fait, il en résulte qu'il y a dans l'espace un pouvoir de coercition, résultant de sa constitution, qui rend impossibles les lignes et les surfaces autres que celles qui s'adaptent à sa forme essentielle. Si l'espace n'est pas « plat », mais sphérique par exemple, — dans l'intérêt de l'argument, j'attribue pour un instant, un sens intelligible à l'assertion que l'espace ordinaire

1. *Kritik der reinen Vernunft* (ed. Rosenkranz), p. 49.

2. Cf. « The Origin and Meaning of Geometrical Axioms », *Mind*, vol. III, p. 212 seq., et aussi *Die Thatsachen in der Wahrnehmung*, Berlin, 1873.

« euclidien » est plat, — alors toute ligne en lui suit nécessairement un cours défini auquel elle est astreinte par la loi interne qui gouverne l'arrangement de ses parties. De là on conclut légitimement et inévitablement que, dans un espace d'une courbure définie particulière, des lignes de différents degrés de courbure sont impossibles. La mesure de la courbure d'un tel espace étant une fois déterminée, toutes ses lignes doivent s'y conformer. Il ne sert à rien de répondre que Lobatschewsky et Beltrami ont montré la possibilité pratique de construire des systèmes géométriques cohérents et logiques, sur le principe du non-parallélisme des « plus courtes lignes », et que le professeur Lipschitz a démontré que les lois du mouvement, comme dépendant des forces motrices, pourraient aussi être transportées sans contradictions dans l'espace sphérique ou pseudo-sphérique, de sorte que l'expression qui comprend toutes les lois de la dynamique, le principe de Hamilton, peut être transporté directement aux espaces dont la mesure de courbure est autre que zéro. En effet, les constructions de Lobatschewsky et de Beltrami (qui servent aussi de base aux recherches de Lipschitz) sont toutes des constructions de *lignes* et de *surfaces* : or ces constructions reposent sur des postulats complètement opposés aux propriétés de l'espace non-euclidien. Un de ces postulats, c'est que, dans l'espace sphérique aussi bien que dans l'espace pseudo-sphérique, il est possible de tracer des lignes d'un degré de courbure quelconque, par conséquent aussi des lignes dont la courbure est zéro, c'est-à-dire des lignes droites dans le vieux sens. Comment en vérité, la « mesure de la courbure » pourrait-elle être déterminée autrement ? Cette mesure dépend du *rayon* de courbure ; d'après Gauss, la mesure de la courbure appartenant à chaque surface qui admet le mouvement des figures tracées dessus sans que les lignes ou les angles en soient changés, est la réciproque constante du plus grand et du plus petit rayon de courbure. Ces rayons sont des rayons droits, au vieux sens du mot ; car s'ils n'étaient pas droits, ils seraient d'un degré défini de courbure, qui ne pourrait à son tour être déterminé que par rapport à un autre rayon particulier, et ainsi de suite, soit *ad infinitum*, soit jusqu'à ce que nous arrivions à la vieille ligne droite euclidienne.

Les prémisses légitimes de la théorie de l'espace non euclidien conduisent à cette conclusion inévitable que les lignes d'un tel espace, bien que courbes, n'ont ni tangentes ni normales, ni rayons, ni cordes, et que sur le terrain des postulats non euclidiens, elles sont complètement indéterminables. C'est encore un exemple curieux de l'erreur ontologique d'après laquelle les choses et les formes sont déterminables en elles-mêmes, sans être mises en rapport ou en contraste avec des choses et des formes corrélatives. Ce qui est spécialement remarquable dans ce côté de la doctrine des transcendentalistes, c'est l'attribution, à l'espace réel, d'une disjonction essentielle entre les formes de sa prétendue courbure — l'assertion que sa mesure de courbure doit être *soit* positive, *soit* négative, *soit* nulle. Cette assertion est d'autant plus remarquable que d'après les transcendentalistes, la nouvelle doctrine a brisé les limites arbitraires du vieux système géométrique, et qu'elle forme un élargissement, une extension logique de l'idée d'espace.

La source de toutes les perplexités dans lesquelles nous enveloppent les suppositions des transcendantalistes est si évidente qu'il est étonnant qu'elle soit restée complètement inconnue des adversaires de la nouvelle doctrine aussi bien que de ses adhérents. L'erreur mère de cette doctrine, c'est l'assertion que l'espace dont s'occupe la géométrie euclidienne ordinaire est « plat » et non sphérique ou pseudo-sphérique. *La vérité, c'est que l'espace, dont l'idée ou la notion est au fond de toute construction géométrique quelconque, y compris celle des pangéomètres, n'est ni plat, ni sphérique, ni pseudo-sphérique, ni d'aucune autre figure inhérente, mais qu'il est simplement la possibilité intuitionnelle et conceptuelle de tracer l'une quelconque des lignes ou toutes les lignes qui déterminent les surfaces planes, sphériques, ellipsoïdales, paraboloidales, hyperboloïdales, etc., et, jusqu'à un certain point, pseudo-sphériques, — possibilité due à cette circonstance, qu'il n'est ni plus ni moins qu'un concept formé en écartant de notre représentation mentale des objets physiques, non-seulement tous les attributs constituant leurs propriétés physiques autres que l'étendue, mais aussi toutes les déterminations de figure par lesquelles ils se distinguent.* C'est le seul sens dans lequel

nous ayons le droit de parler de l'espace comme égal ou homoïdal. L'espace n'a pas de structure interne ni de figure propre, parce qu'il n'est pas un objet physique, et, par suite, n'a pas de « propriétés » qui puissent être connues par expérimentation ou observation. Il n'a pas non plus de propriétés, dignes de ce nom, qui soient déterminables *a priori*, par un acte d'intuition. L'espace est un de ces termes ultimes d'abstraction dans lesquels la connotation coïncide avec la dénotation, et où, par conséquent la connotation est à son terme. Je le répète, l'espace n'a pas de propriétés ; car, considéré comme une entité, il n'a pas de relations, son essence même étant une négation ou une abstraction de toutes les relations. Pour cette raison c'est un abus de termes que de définir la géométrie (comme on le fait si fréquemment, comme l'a fait dernièrement le professeur Henrici¹) « la science dont l'objet est de rechercher les propriétés de l'espace ». L'objet de la géométrie est la recherche des déterminations ou limitations possibles de l'espace, c'est-à-dire des relations entre les diverses formes de l'étendue, ou des propriétés des figures². Toute la science géométrique s'occupe de ce que le concept d'espace exclut nécessairement, savoir, des déterminations ou des limites. La géométrie, en effet, se réfère à l'espace, en tant que les déterminations dont elle s'occupe sont des déterminations spatiales. De ce fait naît la différence entre le but de la géométrie et celui des autres branches des mathématiques pures, et l'inapplicabilité de beaucoup des méthodes et des résultats de l'analyse mathématique aux relations entre les formes de l'espace, — différence dont la négligence est si féconde en erreurs de raisonnement, chez ceux qui cherchent à tirer des conclusions relativement aux « propriétés » de l'espace (telles que le nombre possible de ses dimensions), du concept abstrait de *quantité*. La géométrie est sans doute une science empirique, bien que ce ne soit pas dans le sens donné ordinairement au mot « empirique », ni surtout dans le sens que lui donnent Mill et les transcendentalistes géométriques. Elle est une science empirique en tant qu'elle

1. *Encycl. Britann.*, au mot *Geometry*.

2. En ce sens D'Alembert (*Éléments de Philosophie*, § 15, — *Œuvres*, tome I, p. 268) définit la géométrie « la science des propriétés de l'étendue, en tant qu'on la considère comme simplement étendue et figurée ».

s'occupe d'une propriété des choses physiques, l'*étendue*, qui est une donnée ultime, ou plutôt primaire et irréductible, de l'acte de sensation, — précisément comme la sensation de couleur, avec laquelle, je l'ai montré déjà, l'intuition visuelle de l'espace est invariablement associée. Toutes les tentatives, comme celle d'Herbart, — pour produire l'« idée » d'étendue par une élaboration des données de la sensation que l'on appelle ordinairement qualitatives, — sont aussi infructueuses que les tentatives correspondantes pour déduire les éléments qualitatifs de la sensation des formes de l'étendue. La donnée primaire de l'étendue est l'élément empirique de la géométrie. Cette donnée primaire n'est pas l'espace, mais l'*étendue limitée*, car la sensation et l'intuition ont pour objet des corps particuliers, c'est-à-dire d'étendue limitée, et non l'étendue en général ou l'espace. Cependant les formes de l'étendue limitée donnent naissance au concept d'espace, par l'application des procédés d'abstraction que j'ai indiqués. D'autre part, les conclusions de la géométrie ne dérivent pas seulement de données empiriques, et ne sont pas obtenues comme Mill le prétend, par des procédés inductifs; dans ce sens la géométrie n'est pas une science empirique. *Il n'y a pas d'axiome de géométrie qui soit simplement une donnée de la sensation, comme l'affirment les sensualistes, ou de l'intuition, comme le prétendent les idéalistes ou les intellectualistes.* Tous les axiomes géométriques qui servent de points de départ à des déductions contiennent deux éléments : un élément d'intuition (emprunté à la sensation) et un élément de détermination intellectuelle arbitraire qu'on appelle *définition*. L'étendue et ses limites, — surfaces, lignes et points, — sont donnés dans l'intuition. Sans l'expérience sensible, nous ne connaîtrions rien des solides, surfaces, lignes et points géométriques; mais on ne peut rien déduire de l'existence de ces éléments, ou de l'intuition que nous en avons, tant qu'ils ne sont pas définis. Ceci est évident à la simple inspection des axiomes géométriques. Cet axiome que d'un point à un autre on ne peut tirer qu'une seule ligne droite (ou, ce qui est la même chose, que deux lignes droites ne peuvent pas entourer un espace) implique la définition de la ligne droite, — définition, d'ailleurs, beaucoup plus difficile sur un terrain purement géométrique que celle

des parallèles ¹. De plus, l'axiome relatif aux parallèles, sous la forme nouvelle qu'on lui donne généralement, — par un point donné, on ne peut tracer qu'une droite parallèle à une autre droite, — suppose non-seulement la définition, de la ligne droite, mais aussi celle du parallélisme. Or, dans la géométrie élémentaire, cette dernière définition a l'inconvénient d'impliquer le concept d'une étendue infinie, et a donné naissance à d'innombrables embarras (par exemple celui de points d'intersection infiniment éloignés, et pourtant réels); les embarras de l'espèce pangéométrique ne sont même pas les moindres. La liste Euclidienne de définitions, postulats et axiomes n'est pas seulement viciée, par ce fait que les lignes de démarcation entre ces diverses conditions préalables du raisonnement géométrique ne sont pas correctement tracées, — qu'il confond les définitions avec les axiomes, et les postulats avec l'un et l'autre², et, d'ailleurs, ne distingue pas les axiomes sur la *quantité en général* des axiomes sur la *quantité spatiale*. — La liste d'Euclide pêche encore par l'ignorance ou la négligence de ce fait que j'ai déjà signalé, que chaque axiome géométriquement fécond, implique une définition. Cette ignorance, — très excusable au temps d'Euclide, — paraît malheureusement être partagée par les auteurs des manuels de géométrie contemporains.

1. La source réelle de cette difficulté est le défaut fondamental des théories courantes de la connaissance, — c'est qu'on n'a pas vu que toutes les séries de raisonnements déductifs impliquent une référence ultime à des constantes primaires qui ne sont pas données dans l'expérience, mais établies par l'esprit. Cette constante primaire en géométrie est la ligne droite, ou simple direction. On sait depuis longtemps que les difficultés du 10^e Axiome d'Euclide (« deux lignes droites ne peuvent clore un espace ») sont de la même nature que celles du 12^e (ordinairement appelé le 11^e — l'axiome du parallélisme). « La définition et les propriétés de la ligne droite, dit D'Alembert (*Éléments de Philosophie*, § 12, — *Œuvres*, tome I. p. 280) ainsi que des lignes parallèles sont donc l'écueil, et, pour ainsi dire, le scandale des éléments de géométrie. »

2. Hankel *Vorlesungen über die complexen Zahlen und ihre Functionen*, p. 32) attire l'attention sur ce fait que la confusion ci-dessus indiquée est imputable, non à Euclide, mais à ses éditeurs et commentateurs. « Dans tous les manuscrits, dit Hankel, que F. Peyrard a réunis, en préparant son excellente édition d'Euclide (*Œuvres d'Euclide*, trad. en latin et en français, tome I, p. 434), le fameux 11^e principe de la théorie des parallèles se trouve, non parmi les *κωαί ένωαί* relatives aux quantités égales et inégales, mais comme le 5^e postulat (*αίττημα*). De même le 10^e axiome est dans tous ces manuscrits, le 4^e postulat, tandis que les MSS varient sur le 12^e axiome. Il est donc évident que ces trois postulats doivent à une méprise la place qu'ils occupent encore, on ne sait pourquoi, dans la liste des axiomes.

Un des points sur lesquels le débat entre Helmholtz et ses adversaires s'est prolongé, c'est cette question : l'espace pseudo-sphérique de Beltrami est-il ou non concevable ou imaginable (*vorstellbar*)? Pour soutenir l'affirmative, Helmholtz propose une remarquable définition de l'imaginabilité. Il définit le pouvoir d'imaginer les formes spatiales « le pouvoir de se représenter complètement les impressions sensibles que l'objet exciterait en nous d'après les lois connues de nos organes des sens, sous toutes les conditions d'observations concevables, et par lesquelles il se distinguerait des autres objets semblables¹ ». Quel que soit le mérite général de cette définition, on peut certainement lui reprocher d'être en dehors du sujet. Comme le disaient les anciens logiciens, elle est fondée sur une *ignoratio elenchi*, sur une fausse interprétation de la question. Accordons, dans l'intérêt de l'argument, que l'acte d'imaginer une forme de l'espace est véritablement décrit comme une anticipation des impressions des sens. Pour répondre à la question il faut se demander non pas quelle serait la nature de ces impressions, mais si elles peuvent ou non coexister dans l'imagination, dans l'ordre spatial et avec la forme requise, conformément aux lois connues de la faculté représentative, Helmholtz renvoie à la tentative de Beltrami pour rendre représentable l'espace pseudo-sphérique en projetant les points, lignes et surfaces, sur l'intérieur d'une surface sphérique ordinaire, « dont les points correspondent aux points infiniment distants de l'espace pseudo-sphérique ». Il prétend que cette tentative est suivie de succès. Dans le même sens, le Professeur Sylvester, dans la note de son discours d'Exeter déjà cité, observe que « toute représentation en perspective de l'espace figuré à quatre dimensions, est une figure dans l'espace réel, et que les propriétés des figures peuvent être étudiées dans une large mesure, sinon complètement, avec leurs représentations en perspective ». C'est devenu une assertion habituelle des pangéomètres que les formes d'un espace, d'un nombre donné quelconque de dimensions, peuvent être projetées dans l'espace qui a une dimension de moins. Mais cette assertion ne vaut, tout au plus, que pour les limites de projection dans lesquelles le point ou la figure obtenue

1. • *Origin and Meaning of Geometrical Axioms* », *Mind*, vol. III, p. 215.

cesse d'être une reproduction complète de la figure projetée. Quand une ligne droite est projetée orthogonalement sur une autre ligne droite placée à angle droit, elle produit un point ; une forme de la première dimension est en un sens, réduite à la dimension zéro. Mais par lui-même, le point qui la représente, ne nous rend pas capables de reproduire et de soumettre au raisonnement la ligne dont il est la projection. Sans doute, nous savons au moins que la ligne projetée est droite ; mais c'est une conclusion qui résulte seulement des propriétés des lignes telles qu'elles sont connues d'ailleurs ; de la simple inspection de ce point, on ne peut pas même inférer qu'il est la projection d'une ligne. De même un plan peut être projeté sur un autre plan, de façon à produire une ligne, une forme à deux dimensions étant réduite à une forme à une dimension ; mais il n'en résulte pas que nous puissions étudier les propriétés du plan en contemplant simplement ou en analysant la ligne. En fait, les prétendues projections de solides sur des surfaces sont les projections, sur une surface normale, de plusieurs surfaces faisant avec elle différents angles, et les inférences tirées d'une telle projection relativement aux propriétés des solides géométriques dépendent de nos associations d'impressions visuelles avec des impressions tactiles qui sont l'origine de notre appréhension de la solidité géométrique. Comme il n'y a, on le reconnaît, aucune impression tactile ou autre mettant en évidence l'existence d'une quatrième dimension, l'analogie sur laquelle s'appuie la prétendue imaginabilité des formes d'espace transcendentales est sans fondement.

Mais peu importe sur quoi se fonde la prétention (produite récemment sous une autre forme par Félix Klein¹) que les ressources des projections géométriques sont suffisantes pour nous rendre capables de nous représenter les propriétés d'un espace à plus de trois dimensions, dans l'espace à trois dimensions : car la question de la représentabilité est totale-

1. « Ueber die nicht Euclidische Geometrie », *Math. Ann.*, vol. IV, p. 573. Dans cet article, comme dans presque tous les écrits des pangéomètres qui s'occupent de points *ad libitum* imaginaires et infiniment éloignés, la représentabilité analytique (au moyen de symboles parmi lesquels l'infini et les éléments imaginaires sont traités comme coordonnés avec des éléments réels) est confondue avec l'imaginabilité.

ment étrangère au sujet de la discussion. Si on montrait, par exemple, qu'une surface pseudo-sphérique peut être, mentalement ou réellement tracée *dans* l'espace, cela ne prouverait pas, assurément, ou ne tendrait pas à prouver, que l'espace est essentiellement pseudo-sphérique. Il n'y a pas de doute sur l'imaginabilité d'une surface sphérique, mais il n'en résulte pas que l'espace lui-même est sphérique. Pour démontrer la pseudo-sphéricité immanente de l'espace, il serait nécessaire d'établir que les surfaces pseudo-sphériques seules peuvent exister, et par suite (conformément aux enseignements du sensualisme), peuvent être représentées, ou imaginées comme existantes dans cet espace. Alors, tout l'argument de Helmholtz, non-seulement cesse d'être valable en faveur du transcendentalisme géométrique, mais tourne contre lui. Si les surfaces pseudo-sphériques peuvent être imaginées comme existantes, si, d'après ses propres principes, elles sont possibles dans l'espace « plat », pourquoi les lignes droites ordinaires et les surfaces plates ne pourraient-elles pas exister dans l'espace pseudo-sphérique? Qu'advient-il alors de sa preuve télescopique de la courbure de l'espace? — Ou bien ai-je mal saisi ce que veut dire Helmholtz? Prétend-il simplement que les surfaces pseudo-sphériques seraient imaginables pour des êtres pseudo-sphériques, avec des organes des sens pseudo-sphériques et des intelligences pseudo-sphériques dans un espace pseudo-sphérique, s'il y en avait un? C'est là une proposition que Land et Krause eux-mêmes ne discuteraient peut-être pas.

L'histoire théorique de la connaissance n'offre peut-être pas d'exemple plus instructif que les doctrines de la géométrie transcendente, pour montrer la puissance des traditions intellectuelles. En jetant un regard sur le contenu du présent chapitre, nous voyons que la science mathématique elle-même — la plus exacte de toutes les sciences, dont les méthodes passent pour aussi infaillibles que ses fondements sont supposés éternels, et qui, depuis l'aurore de l'intelligence humaine a poursuivi sa route tout droit au milieu des vicissitudes de la spéculation — n'est pas exempte des préjugés du réalisme ontologique. La même hypostase ou objectivation de concepts, qui a donné naissance à la théorie atomo-mécanique en physique, a conduit à la doctrine de la pangéométrie en mathématiques.

L'hypostase de l'espace chez les mathématiciens est rigoureusement l'analogie de l'hypostase de la masse et du mouvement chez les physiciens.

Cependant l'erreur à laquelle le flambeau trompeur de l'ontologie a conduit les mathématiciens contemporains, peut être encore mieux mise en lumière par l'examen du fondement spéculatif de la géométrie transcendente, tel qu'il est exposé dans le fameux essai de Riemann déjà mentionné plus haut.

CHAPITRE XIV

L'ESPACE MÉTAGÉOMÉTRIQUE

D'APRÈS L'OUVRAGE DE RIEMANN

L'ouvrage de Bernhard Riemann, « Sur l'hypothèse qui est la base de la géométrie », doit sa grande célébrité à ce que l'auteur était un savant de premier ordre dans l'analyse mathématique, et l'un des élèves favoris de Gauss. C'est sous l'inspiration de son enseignement, sinon à son instigation, que l'ouvrage fut écrit, c'est lui, de plus, qui le présenta, en 1854, peu avant sa mort, à la Faculté de philosophie de Göttingen, et qui en adopta expressément les propositions fondamentales comme exposant ses propres opinions spéculatives. Tous les lecteurs intelligents de cet ouvrage reconnaîtront avec moi, je pense, que son mérite intrinsèque n'est pas en rapport avec la faveur qui l'accueillit, ni avec l'intérêt qu'on lui accorde encore généralement. Non seulement l'exposé du problème, et des méthodes proposées pour le résoudre, y est grossier et confus, mais il montre d'un bout à l'autre combien était imparfaite la connaissance qu'avait Riemann de la nature des procédés logiques, et même du sens des termes logiques. Il ressort de l'ensemble de l'ouvrage que l'auteur était complètement étranger aux discussions sur la nature de l'espace si vigoureusement menées par les plus éminents penseurs de notre temps depuis Kant, et qu'il était si peu familier avec l'histoire de la logique qu'il n'avait pas le moindre soupçon de l'ambiguïté de termes tels que « concept » et

« quantité », ni de la nécessité de les définir exactement avant toute recherche sur les vrais fondements de la science humaine¹.

Voici un résumé de l'ouvrage. Riemann affirme d'abord que la nature de l'espace doit être déduite de son concept : que la formation d'un tel concept implique nécessairement la subordination à un concept plus élevé ; que ce concept plus élevé est celui d'une « quantité multiplement étendue » ; que, pour déterminer combien il y a d'espèces possibles d'espace, il est nécessaire de déterminer de combien de manières la quantité peut être « multiplement étendue » (*mehrfach ausgedehnt*) ; et que, lorsque le nombre des variétés ou espèces d'étendue multiple conceptuellement possibles a été ainsi fixé, c'est à l'expérience de déterminer laquelle de ces variétés ou espèces est représentée par notre espace, c'est-à-dire par l'espace dans lequel existe le monde tel que nous le connaissons. Après avoir ainsi affirmé que le concept d'espace est contenu dans le concept de quantité, Riemann déclare que toutes les quantités sont au fond des multiples ou agrégats (*Mannigfaltigkeiten*) qui sont *continus* toutes les fois qu'il y a transition continue de l'une des diverses « spécialisations » à l'autre, et *discrets* quand il n'y a pas de semblable transition ; que les « spécialisations » des quantités discrètes s'appellent *points*, et celles des quantités continues *éléments*, et que les

1. Riemann lui-même s'excuse modestement de l'insuffisance philosophique de son essai par son inexpérience en matière de philosophie. Mais la grossièreté de ses spéculations est, à mon avis, un exemple bien frappant de ce fait bien connu que l'étude exclusive de l'analyse mathématique a une tendance à développer certaines facultés spéciales de l'esprit aux dépens de sa pénétration et de sa force générales. Quoique sir William Hamilton ait exagéré ses expressions contre les mathématiciens, je crois que ses suggestions ne sont pas complètement indignes d'attention, et qu'il y a de la force dans ces paroles de D'Alembert (citées par sir William Hamilton). Il est peut-être plus sûr de citer dans l'original, sans traduire : « Il semble que les grands géomètres devraient être excellents métaphysiciens, au moins sur les objets dont ils s'occupent ; cependant il s'en faut bien qu'ils le soient toujours. La logique de quelques-uns d'entre eux est renfermée dans leurs formules et ne s'étend pas au delà. On peut les comparer à un homme qui aurait le sens de la vue contraire à celui du toucher, ou dans lequel le second de ces sens ne se perfectionnerait qu'aux dépens de l'autre. Ces mauvais métaphysiciens dans une science où il est si facile de ne le pas l'être, le seront à plus forte raison infailliblement comme l'expérience le prouve, sur les matières où ils n'auront pas le calcul pour guide. Ainsi la géométrie qui mesure les corps peut servir dans certains cas à mesurer les esprits même. » D'Alembert, *Éléments de Philosophie*, § 41 ; *Œuvres*, tome I, p. 276.

quantités continues sont déterminées par mesure, tandis que les quantités discrètes sont déterminées par numération. L'espace, d'après Riemann, tout en étant une quantité continue, est une quantité d'étendue (géométrique) n -uple, elle forme ainsi un Multiple ou Agrégat, et par suite une quantité, malgré sa continuité. Le degré de multiplicité de cette étendue, c'est-à-dire le fait d'être simple, double, triple, ou, en général, n -uple, détermine l'étendue (logique) du concept d'espace. »

Nous avons ici cinq propositions distinctes, qui, pour les besoins de l'exposé et de la discussion, peuvent être formulées séparément comme il suit :

1. La nature de l'espace doit être déduite de son concept.
2. Le concept d'espace ne peut être formé et déterminé qu'en le faisant rentrer dans un concept plus élevé.
3. Notre espace est « un multiple ou agrégat triplement étendu », le concept supérieur sous lequel on doit ranger le concept d'espace étant celui d'un « multiple n fois étendu » ou un « agrégat multiplement étendu » (*eine n-fach ausgedehnte Mannigfalligkeit*), et que, — en traduisant la phrase de Riemann dans son vrai sens logique, — l'étendue (logique) de ce concept plus élevé détermine le nombre des espèces possibles de l'espace.
4. La possibilité conceptuelle de l'espace coïncide, comme extension, avec sa possibilité empirique, bien qu'elle ne coïncide pas de même avec sa réalité empirique.
5. Les quantités continues sont coordonnées avec les quantités discrètes, c'est-à-dire sont des espèces du même genre, étant au fond les unes et les autres des multiples ou agrégats ¹.

1. L'ordre et le numérotage de ces propositions est, d'ailleurs, de moi ; dans l'essai de Riemann, elles se présentent dans un ordre très mêlé. Comme preuve de l'exactitude générale de mon exposition des doctrines de Riemann, il est peut-être bon de citer l'introduction de son essai dans le texte, en écrivant en italiques les passages les plus importants :

- *Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen.*
- *Plan der Untersuchung.*

• Bekanntlich setzt die Geometrie sowohl den Begriff des Raumes, als die ersten Grundbegriffe für die Constructionen im Raume als etwas Gegebenes voraus. Sie giebt von ihnen nur Nominaldefinitionen, während die wesentlichen Bestimmungen in Form von Axiomen auftreten. Das Verhältniss dieser Voraussetzungen bleibt dabei im Dunkeln ; man sieht weder ob und in wie weit ihre Verbindung nothwendig, noch *a priori*, ob sie möglich ist.

• Diese Dunkelheit wurde auch von Euklid bis Legendre, um den berühm-

Je discute ces propositions dans leur ordre :

1. La première proposition est en propres termes l'expression de cette erreur ontologique générale (discutée tout au long au chapitre IX) que les choses et leurs propriétés doivent se déduire des concepts que nous en avons. Comme je l'ai

testen neueren Bearbeiter der Geometrie zu nennen, weder von den Mathematikern, noch von den Philosophen, welche sich damit beschäftigten, gehoben. Es hatte dies seinen Grund wohl darin, dass der allgemeine Begriff mehrfach ausgedehnter Grössen, unter welchen die Raumgrössen enthalten sind, ganz un- bearbeitet blieb. Ich habe mir daher zunächst die Aufgabe gestellt, den Begriff einer mehrfach ausgedehnten Grösse als allgemeinen Grössenbegriffen zu construiren. Es wird daraus hervorgehen dass eine mehrfach ausgedehnte Grösse verschiedener Maassverhältnisse fähig ist, und der Raum also nur einen besondern Fall einer dreifach ausgedehnten Grösse bildet. Hiervon aber ist eine nothwendige Folge, die Sätze der Geometrie sich nicht aus allgemeinen Grössenbegriffen ableiten lassen, sondern dass diejenigen Eigenschaften, durch welche sich der Raum von andern denkbaren dreifach ausgedehnten Grössen unterscheidet, nur aus der Erfahrung entnommen werden können. Hieraus entsteht die Aufgabe, die einfachsten Thatsachen aufzusuchen, aus denen sich die Maassverhältnisse des Raumes bestimmen lassen — eine Aufgabe, die der Natur der Sache nach nicht völlig bestimmt ist, denn es lassen sich mehrere Systeme einfacher Thatsachen angeben, welche zur Bestimmung der Maassverhältnisse des Raumes hinreichen ; am wichtigsten ist für den gegenwärtigen Zweck das von Euklid zu Grunde gelegte. Diese Thatsachen sind, wie alle Thatsachen, nicht nothwendig, sondern nur von empirischer Gewissheit, sie sind Hypothesen, man kann also ihre Wahrscheinlichkeit, welche innerhalb der Grenzen der Beobachtung allerdings sehr gross ist, untersuchen und hienach über die Zulässigkeit ihrer Ausdehnung jenseits der Grenzen der Beobachtung sowohl nach der Seite des Unmessbaren als nach der Seite des Unmessbarkeinen urtheilen.

• I. Begriff einer n -fach ausgedehnten Grösse.

• Indem ich nun von diesen Aufgaben zunächst die erste, die Entwicklung des Begriffes mehrfach ausgedehnter Grössen, zu lösen versuche, glaube ich um so mehr auf eine nachsichtige Beurtheilung Anspruch machen zu dürfen, da ich in dergleichen Arbeiten philosophischer Natur, wo die Schwierigkeiten mehr in den Begriffen, als in den Constructionen liegen, wenig geneigt bin und ich ausser einigen ganz kurzen Andeutungen welche Herr Hofrath Gauss in der zweiten Abhandlung über die biquadratischen Reste, in den Göttingischen Gelehrten-Anzeigen und in seiner Jubiläumsschrift, darüber veröffentlicht hat, und einigen philosophischen Untersuchungen Herbart's durchaus keine Vorarbeiten benutzen konnte.

• Grössenbegriffe sind nur da möglich, wo sich ein allgemeiner Begriff vorfindet, der verschiedene Bestimmungsweisen zulässt. Je nachdem unter diesen Bestimmungsweisen von einer zu einer andern ein stetiger Uebergang stattfindet oder nicht, bilden sie eine stetige oder discrete Mannigfaltigkeit: die einzelnen Bestimmungsweisen heissen im ersten Fall Punkte, in letzterem Elemente dieser Mannigfaltigkeit. Begriffe, deren Bestimmungsweisen eine discrete Mannigfaltigkeit bilden, sind so häufig, dass sich für beliebig gegebene Dinge wenigstens in den gebildeteren Sprachen immer ein Begriff auffinden lässt unter welchem sie enthalten sind (und die Mathematiker konnten daher in der Lehre von den discreten Grössen unbedenklich von der Forderung ausgehen, gegebene Dinge als gleichartig zu betrachten), dagegen sind die Veranlassungen zur

déjà dit, Riemann ne définit pas le terme « concept » et ne recherche pas davantage comment se forment les concepts, ni comment ils entrent dans l'esprit. Il dit, il est vrai, que les concepts de quantité ne sont possibles que quand ils peuvent être subordonnés à des concepts plus élevés, ou, selon son expression, « quand il y a un concept général qui admet différentes spécialisations ». Mais la question de savoir où commence, où finit ce processus de subordination, et quelles sont la nature et l'origine du concept le plus élevé ou *summum genus* dont tous les genres inférieurs ou espèce doivent être des spécialisations, cette question ne lui vient pas à l'esprit. Cependant, la forme même de sa première proposition montre qu'il considère ce concept le plus général comme une forme ou possession *a priori* de l'esprit, et qu'il croit que la marche déductive par laquelle ses spécialisations en sont dérivées forme — pour adopter le langage de Kant — une série de jugements synthétiques *a priori*. Dès lors, cette proposition n'a pas besoin d'être discutée plus longuement : elle

Bildung von Begriffen, deren Bestimmungsweisen eine stetige Mannigfaltigkeit bilden, im gemeinen Leben so selten, dass die Orte der Sinngegenstände und die Farben wohl die einzigen einfachen Begriffe sind, deren Bestimmungsweisen eine mehrfach ausgedehnte Mannigfaltigkeit bilden. Häufigere Veranlassung zur Erzeugung und Ausbildung dieser Begriffe findet sich erst in der höhern Mathematik.

• Bestimmte, durch ein Merkmal oder eine Grenze unterschiedene Theile einer Mannigfaltigkeit heissen Quanta. Ihre Vergleichung der Quantität nach geschieht bei den discreten Grössen durch Zählung, bei den stetigen durch Messung.... Für den gegenwärtigen Zweck genügt es, aus diesem allgemeinen Theile der Lehre von den ausgedehnten Grössen, wo weiter nichts vorausgesetzt wird, als was in dem Begriffe derselben enthalten ist, zwei Punkte hervorzuheben, wovon der erste die Erzeugung des Begriffs einer mehrfach ausgedehnten Mannigfaltigkeit auf Quantitätsbestimmungen betrifft, und das wesentliche Kennzeichen einer n-fachen Ausdehnung deutlich machen wird. »

Je dois dire que mes interprétations de plusieurs passages de ce texte sont plus ou moins conjecturales. Il y a lieu, par exemple, de se demander sérieusement si l'expression *Bestimmungsweisen* désigne l'espèce comprise dans un genre ou les parties constituant un tout. Une mauvaise traduction de l'essai de Riemann, qui, pour être grossièrement littérale, ajoute matériellement à l'obscurité et à la confusion de l'original, fut publiée en 1873, par W.-K. Clifford (*Nature*, vol. VIII, pp. 14 et 36, seq.) Cette traduction fut faite, sans doute, non par, mais pour le professeur Clifford, par quelqu'un qui avait une connaissance très insuffisante de l'allemand. Ce qui montre bien la valeur de la traduction, c'est qu'il rend le terme de Riemann « *Mannigfaltigkeiten* » (variétés, multiplicités, au sens de multiples — Helmholtz traduit « *aggregates* ») par « *Manifestnesses* », de « *Grössenbegriffe* » par « *magnitude-notions* », etc. Dans un passage, tout le sens est changé pour avoir lu *könnten* au lieu de *konnten*.

est réfutée par tout l'ensemble des précédents chapitres de ce livre. Qu'on me permette d'observer, cependant, qu'elle est sans exemple dans toute l'histoire de l'intellectualisme (appelé ordinairement idéalisme); Kant, par exemple, repousse expressément toute croyance à cette doctrine que l'esprit serait originellement pourvu de concepts tout faits.

2. La seconde proposition, qu'on ne peut former et déterminer des concepts de quantité qu'en les subordonnant à des concepts plus généraux, est probablement une vague réminiscence de cette vieille règle logique que toute définition se fait *per genus et differentiam*. Bien que Riemann se plaigne, dans la seconde phrase de son ouvrage, que jusqu'ici la science de la géométrie n'ait donné que des définitions nominales de l'espace et des constructions dans l'espace — plainte qui, d'ailleurs, en tant qu'elle s'applique aux constructions dans l'espace, n'est pas fondée, — il ne semble pas avoir une idée bien claire de la nature de la distinction entre les définitions et les concepts. S'il avait convenablement médité cette distinction, il n'aurait pas manqué de se demander ce que devenait, avec sa définition, le *summum genus* « quantité » qui est le terme logique du processus de subordination dont il parle. Ce *summum genus* est-il aussi un concept? Alors il doit pouvoir être inclus, conformément à cette règle, dans un concept encore plus élevé, ce qui, *ex vi termini*, n'a pas lieu puisqu'il est lui-même le plus élevé. Ou bien est-il quelque autre chose — une donnée de l'expérience? Si cela est, comment alors concilier la seconde proposition avec la première d'après laquelle tout doit être déduit d'un concept, aussi bien qu'inclus dans un concept? — Ou serait-ce la vieille histoire de la poule de Newmarket qui pondait un œuf, duquel œuf elle sortait elle-même comme petit poulet.

La proposition discutée ici jette l'auteur presque dès le début dans la perplexité la plus intolérable. « Les concepts, dit-il, dont les spécialisations forment un agrégat discret (ou un multiple) sont si communs que, au moins dans les langues les plus cultivées, on peut toujours trouver un concept dans lequel on peut inclure des choses de toute espèce. » Le sens de ceci est, je suppose, que parmi les agrégats discrets, il y a toujours plusieurs espèces semblables ou de même nature que l'on peut facilement inclure dans

un concept supérieur. « Mais, continue-t-il, les occasions de former des concepts dont les spécialisations constituent un agrégat continu, sont si rares dans la vie ordinaire, que les places des choses et les couleurs sont probablement les seuls concepts simples dont les spécialisations constituent un agrégat multiplement étendu », — c'est-à-dire, je suppose, qu'il n'y a qu'une espèce d'agrégat ou multiple continu autre que l'espace, qui admette d'être coordonné et réuni avec lui sous le concept d'« agrégat multiplement étendu », savoir la couleur. Cette phrase singulière — par parenthèse, elle est exactement le contraire de la vérité, car il n'y a, nous le montrerons plus loin, qu'une seule quantité discrète, le nombre, et d'innombrables espèces de quantités continues — cette phrase a provoqué une étrange prodigalité d'efforts analytiques de la part de Benno Erdmann¹ : il trouve qu'il y a *deux* multiples triplement étendus qui peuvent être coordonnés et réunis avec l'espace de trois dimensions sous le concept d'un « agrégat multiplement étendu continu » : le son et la couleur. Le son, d'après Erdmann, est une fonction de trois variables indépendantes, la *hauteur*, l'*intensité* et le *timbre* (*Klangfarbe*). De même la couleur dépend des variables *ton*, *degré de saturation* (*Sättigungsgrad*), et *intensité*².

Tout ceci est simplement puéril. Imaginer que l'on peut tirer des conclusions sur la nature de l'espace, ou l'origine de son concept, de ce seul fait que l'espace est une fonction de trois variables, et peut ainsi en quelque manière être classé avec des fonctions analogues, c'est se moquer de tout raisonnement. Un ancien scolastique se serait détourné avec dédain, se souvenant que la coordination et l'inclusion, ayant pour but de faciliter la formation d'un concept particulier, doit se faire non-seulement sous un *genus*, mais sous un *genus proximum*³. Cette remarque de Weissen-

1. *Die Axiome der Geometrie* (Leipzig, 1877), p. 40 seq.

2. Il est significatif, dans cet ordre d'idées, que, d'après Helmholtz (qui se rencontre avec Riemann pour cette théorie de la conception), les trois variables de la fonction « couleur » sont les trois couleurs primaires dont toutes les couleurs sont, dit-on, des mélanges. *The Origin and Meaning*, etc. Mind, vol. I, p. 309.

3. Erdmann semble avoir eu quelque idée de cela, car il remarque que l'espace diffère de la couleur et du son par cette circonstance que les trois dimen-

born¹ que, d'après les mêmes principes logiques, l'espace pourrait être coordonné avec le montant de l'intérêt produit par un certain capital, — qui est fonction des trois variables *capital, taux de l'intérêt, et temps*, — est parfaitement juste. Le nombre des espèces coordonnées avec l'espace dans le même sens pourrait être indéfiniment accru. Par exemple, l'espace pourrait être coordonné avec la vitesse d'un train sur une route droite, puisque cette vitesse est une fonction de la force motrice de la machine, du poids du train, et de la pente de la voie; ou avec la volatilité d'un liquide, qui est une fonction de la nature du liquide, de sa température, et de la pression atmosphérique; ou avec la capacité d'un homme de travail, qui dépend de son état général de santé et de force, de la quantité de nourriture qu'il a prise, et de la quantité de sommeil qu'il a eue; et ainsi de suite indéfiniment. Tout ceci est très absurde, mais pas plus que la coordination de l'espace avec la couleur et le son, sur cette simple raison que chacun des trois dépend de trois variables, qui sont arbitrairement appelées « dimensions ».

3. J'arrive à la troisième proposition de Riemann, que l'espace est un « multiple n fois étendu » ou un « agrégat multiplement étendu » (*eine mehrfach oder n -fach ausgedehnte Mannigfaltigkeit*). Le terme « Mannigfaltigkeit », tel qu'il est employé ici, est un embarras perpétuel pour le lecteur de l'ouvrage de Riemann. Weissenborn, qui critique justement l'emploi d'un adjectif ou prédicat dans un sens appellatif, pour dénoter une entité substantielle, conjecture² qu'il fut inventé expressément par Riemann pour faire rentrer le concept d'espace dans l'objet de sa seconde proposition. Mais c'est une erreur. Riemann emprunte ce terme à Gauss, qui l'a probablement employé le premier pour désigner « l'espace en général » par opposition à l'espace « plat », au sens métageométrique³. Gauss, à son tour, a sans doute pris l'expres-

sions de l'espace peuvent être prises les unes pour les autres tandis que les « dimensions » de la couleur et du son ne le peuvent pas.

1. « Ueber die neueren Ansichten von Baum », *Vierteljahrsschrift für wissenschaftliche Philosophie*, vol. II, p. 321.

2. *Loc. cit.*, p. 320.

3. Dans son *Anzeige* de la *Theoria residuorum biquadraticorum, Commentatio serunda*, Gauss dit : « Der Verfasser hat sich vorbehalten den Gegenstand wel-

sion dans Herbart¹, dont j'ai déjà mentionné la tentative d'une élaboration de l'idée d'espace à l'aide des diverses données qualitatives des sens, et dont la philosophie est, dans une large mesure, une sorte de reproduction des vieilles difficultés éléatiques sur « l'Un et le Multiple ». Herbart, enfin, l'avait tiré de Kant, dont il était ou se croyait le disciple. La phrase « *Mannigfaltigkeiten der Empfindung* » se trouve souvent, non seulement dans les écrits de Kant, mais aussi dans ceux de ses successeurs.

Le seul commentaire que je juge nécessaire à cette proposition, c'est que l'espace n'est pas un « multiple » ou « agrégat », mais que son essence même est la continuité. Ceci résulte, comme on l'a suffisamment montré, de sa nature conceptuelle aussi bien que de sa relativité. La détermination des points de l'espace, ou « éléments » de l'espace, résulte de l'établissement de relations quantitatives entre ses parties, — c'est-à-dire ses divisions purement arbitraires, — au moyen des nombres, de la façon que nous allons voir. J'ai déjà montré, dans le dernier chapitre, que l'espace lui-même n'est, en aucun sens intelligible, une quantité.

4. La quatrième proposition de Riemann est fondée sur une confusion entre la possibilité *conceptuelle* et la possibilité *réelle* ou *empirique*. La possibilité conceptuelle est constituée seulement par l'accord ou le désaccord entre les éléments du concept à former, — elle n'est soumise qu'à la loi logique de non contradiction; tandis que la possibilité empirique dépend de l'accord de la chose conçue avec les diverses conditions de la réalité sensible, ou, ce qui est la même chose, les lois de la nature. Ce sujet aussi a déjà été discuté en quelque mesure dans le dernier chapitre, où l'on montrait que la concevabilité (dans le sens strict du terme) d'une chose ou

cher in der vorliegender Abhandlung eigentlich nur gelegentlich beruehrt ist, künftigt vollständig zu bearbeiten, wo dann auch die Frage, warum die Relationen zwischen Dingen, die eine Mannigfaltigkeit von mehr als zwei Dimensionen darbieten, nicht noch andere, in der allgemeinen Arithmetik zulässige Arten von Grössen liefern können, ihre Beantwortung finden wird », Gauss, Werke, vol. II, p. 178. Cette notice parut originairement dans les *Goettingische Gelehrte Anzeigen*, du 25 avril 1831.

1. Dans sa *Synechologie*, Herbart parle de *Die Mannigfaltigkeit der irrationalen Fortschreitungen in Bezug auf den Baum*. Herbart's Werke, vol. IV, p. 133.

d'un phénomène n'en prouve pas l'imaginabilité ni la représentabilité sous les conditions de notre organisation physique et intellectuelle. De cette distinction dépend le but et l'utilité de cet artifice, — auquel on a souvent recours dans certaines recherches analytiques, — de supposer l'existence d'une quatrième dimension de l'espace, afin de ramener certaines fonctions à une forme symétrique. Cette distinction est aussi la base d'une observation faite par Boole ¹, il y a trente-six ans.

« L'espace se présente à nous, dans la perception, comme possédant les trois dimensions de longueur, largeur et profondeur. Mais, dans une vaste classe de problèmes relatifs aux propriétés des surfaces courbes, à la rotation des corps solides autour de leurs axes, à la vibration des milieux élastiques, etc., cette limite paraît, dans la recherche analytique, avoir un caractère arbitraire, et, *si l'on faisait attention au procédé de solution seul*, on ne trouverait pas de raison pour que l'espace n'existât pas en quatre dimensions, ou un nombre plus grand quelconque. On voit ici clairement à l'aide de quelle analogie l'esprit entre dans le monde imaginaire. » Sur les mêmes bases et dans le même sens, Hermann Grassmann, qui est quelquefois cité comme un des fondateurs de la géométrie transcendente, a développé la théorie de l'étendue dans son application générale à un nombre indéfini de dimensions. Mais il n'a certainement point partagé (comme semble le supposer Victor Schlegel ²) cette illusion que ceci pourrait permettre de conclure quelque chose relativement au nombre des dimensions actuelles ou empiriquement possibles de l'espace. Sur ce sujet nous avons la déclaration explicite de Grassmann lui-même ³ : « Il est clair, dit-il, que le concept d'espace ne peut en aucune façon être engendré par la pensée. . . . Quiconque soutient le contraire doit entreprendre de déduire les dimensions de l'espace des pures lois de la pensée — problème qui, on le voit du premier coup-d'œil, ne comporte pas de solution. »

5. La cinquième proposition de Riemann est étroitement connexe avec ses troisième et quatrième propositions : les

1. *Laws of Thought*, p. 175, note.

2. *System der Raumlehre*, préface, p. vi.

3. *Die lineare Ausdehnungslehre* (1844) Einleitung, p. 20. seq.

quantités continues sont coordonnées avec les quantités discrètes, les unes et les autres étant au fond des multiples ou agrégats, et par suite des espèces du même genre. Cette funeste illusion est une des erreurs traditionnelles courantes des mathématiciens : elle a produit d'innombrables chimères. C'est cette erreur qui a entravé la formation d'une théorie rationnelle, intelligible, conséquente, de ce qu'on appelle les quantités irrationnelles et imaginaires, et enveloppé d'une obscurité impénétrable les vrais principes de la doctrine des « nombres complexes » et du calcul des quaternions.

Cette proposition — que les quantités discrètes et continues sont des espèces coordonnées d'un même genre — conduirait à cette thèse que les signes sont logiquement coordonnés avec les choses signifiées. Il n'y a pas de « quantité discrète » autre que celle dont s'occupe l'arithmétique spéciale (commune) et générale, c'est-à-dire le *nombre*. Or, un nombre est un agrégat ou collection d'unités dont chacune représente simplement *un acte d'appréhension*, quelle que soit l'étendue ou la nature de l'objet saisi. Si cet objet est désigné comme *quantité*, un nombre n'est pas du tout une quantité, ni la mesure d'une quantité, mais simplement un véhicule intellectuel de quantités — un instrument purement intellectuel pour les comparer et les mesurer. Toute l'incertitude et la confusion qui caractérisent les nombreuses tentatives pour définir et classer les quantités sont dues à l'ignorance ou à la négligence de cette vérité élémentaire. La quantité a été définie « ce qui est susceptible d'augmentation, diminution ou division », et « le genre dont la grandeur et la multiplicité sont les espèces ». Ou bien les quantités ont été d'abord divisées en quantités *extensives* (espace) et quantités *intensives* (forces, couleurs, sons et toutes les affections subjectives), et les quantités extensives ont été ensuite subdivisées en *continues* et *discrètes*. Or, le fait est que tous les objets d'appréhension, y compris toutes les données des sens, sont, *en eux-mêmes*, c'est-à-dire dans l'acte d'appréhension, essentiellement continus. Ils ne deviennent *discrètes* qu'en étant soumis, arbitrairement ou nécessairement, à plusieurs actes d'appréhension, et en étant ainsi séparés en parties, ou coordonnés avec d'autres objets appréhendés de la même manière en tout. Dire qu'une donnée de la sensation ou du

sentiment subjectif est en elle-même discrète, c'est affirmer qu'elle est absolue, et nier que la quantité est essentiellement relative. Et soutenir (avec ceux qui parlent de nombres positifs, négatifs, fractionnaires, irrationnels, imaginaires, complexes, linéaires ou directionnels) que le nombre peut être continu, c'est ignorer le fait le plus clair, le plus indiscutable de toutes nos opérations intellectuelles, et mal interpréter tous les enseignements de l'histoire des mathématiques. Les nombres, en eux-mêmes, étant de simples groupes ou séries d'actes d'appréhension intellectuelle, sans tenir compte de leur contenu, ne sont pas et ne peuvent pas être positifs ou négatifs, moins encore fractionnaires, irrationnels et imaginaires. Ils peuvent, il est vrai, être appliqués, non seulement aux données de la sensation et du sentiment subjectif, mais aussi, par analogie, à leurs relations, y compris les relations établies par l'esprit. Ils peuvent donc tenir lieu, non seulement des choses, mais aussi de leurs actions et réactions et des opérations auxquelles ils sont soumis. Un nombre peut représenter un mouvement dans une direction donnée et dans la direction opposée, devenant ainsi affecté des signes *plus* et *moins*; mais ces signes n'indiquent aucun changement dans la nature des nombres, mais seulement une particularité de leur application. De même, les nombres peuvent représenter des rapports et prendre la forme de fractions; mais les nombres ne cessent point par là d'être ce qu'ils sont, c'est-à-dire des unités ou collections d'unités, et par suite essentiellement entiers. Les fractions ne peuvent être appelées nombres qu'en ce sens qu'elles désignent la division, *non des unités primaires qui expriment les actes originaux d'appréhension, mais des objets appréhendés*, en unités subordonnées. En outre, les nombres peuvent désigner des opérations sur les quantités qu'il serait impossible d'effectuer avec succès, comme la réduction de la diagonale et du côté d'un carré à une commune mesure — en d'autres termes, l'établissement d'un rapport numérique défini entre deux quantités qui n'admettent pas un tel rapport. En pareil cas, la vanité de cette tentative s'exprime par un signe placé avant le nombre qui, joint à la chose signifiée, est ordinairement appelé quantité irrationnelle; mais ce qui est irrationnel, ce n'est pas le nombre, mais la tentative de l'appliquer à

des grandeurs incommensurables. La même chose est vraie, *mutatis mutandis*, des « quantités imaginaires » et des « nombres complexes ». L'objet de l'acte d'appréhension qui est représenté par l'unité numérique, peut être non seulement le mouvement rectiligne ou la translation dans une direction donnée, mais aussi le mouvement angulaire, comme l'exprime le calcul des quaternions ; il peut être un vecteur ou un verueur, ou l'un et l'autre ; d'où il suit que quand on essaie de représenter une telle opération en unités linéaires avec leurs signes positifs ou négatifs indiquant une direction fixe, dans laquelle se produisent les mouvements dont les lignes sont les mesures, la tentative échoue encore, et ce fait se présente sous la forme du symbole qui (faisant partie d'un système de symbolisation trop restreint pour embrasser la nouvelle opération) prend ce qu'on appelle la forme imaginaire. Mais ici encore une fois, ce n'est pas le nombre qui est imaginaire, *mais l'opération en tant qu'elle est interprétée conformément aux règles conventionnelles de la symbolisation*, la conséquence étant que ces règles doivent être étendues, et que le sens des symboles doit être élargi. Mais ceci encore signifie un changement, non dans la nature des signes, c'est-à-dire des nombres, mais dans la nature et l'étendue des choses signifiées. De cette manière on étend continuellement le but de la symbolisation arithmétique (et aussi, d'ailleurs, algébrique), non seulement en élargissant, mais aussi en changeant complètement les choses, relations et opérations qui sont successivement les objets de l'appréhension intellectuelle. Tout ceci est parfaitement sûr et légitime, pourvu que le changement dans la signification des symboles soit fait conformément aux règles logiques de la conséquence, et de plus, en tenant compte de l'effet d'un tel changement sur la validité des règles qui gouvernent les synthèses et les analyses auxquelles les symboles sont soumis. Dans l'opération de la multiplication ordinaire arithmétique ou algébrique, par exemple, la loi de commutation est universellement valable. La multiplication n'étant rien de plus qu'une addition abrégée, le multiplicande et le multiplicateur peuvent changer de place ou de fonction sans modifier le résultat. Dans le calcul des quaternions, le mathématicien généralise le principe de la multiplication : il le définit un procédé pour trouver une quantité qui soit faite avec le mul-

tiplicande ou en relation avec lui, comme le multiplicateur est fait avec l'unité ou en relation avec elle. Avec cette nouvelle définition il multiplie les unes par les autres des lignes et autres quantités. Mais on voit maintenant que la loi de commutation n'est plus généralement applicable. La raison en est que l'élargissement apparent du principe de la multiplication était aussi en fait une limitation, ou plutôt un changement du sens du symbole arithmétique ou algébrique — une suppression de la condition dont dépendait la validité de la loi de commutation. J'observerai ici en passant que c'est une erreur de dire, avec Kelland et autres, que le calcul des quaternions sort du calcul arithmétique ou algébrique commun par la suppression des limites. L'exemple que je viens de citer montre qu'il peut admettre aussi bien l'imposition des limites. Pour cette raison, la loi de Peacock, qu'il appelle le « principe de la permanence des formes équivalentes¹ », — à savoir que toutes les formes algébriques qui sont équivalentes quand les symboles sont généraux de forme, mais spécifiques en valeur, seront également équivalentes quand les symboles seront généraux de valeur comme de forme », — loi qu'il donne comme le principe fondamental de la théorie des « nombres complexes », exige une modification bien plus sérieuse que la modification contenue dans la nouvelle formule donnée par Hankel : « le principe de la permanence des lois formelles ». L'expression « lois formelles » est ambiguë; elle ne nous apprend pas quelles lois sont formelles, dans le sens d'applicables à toutes les opérations qui peuvent être représentées, d'une manière quelconque, par des symboles arithmétiques ou algébriques.

L'erreur relative à la vraie nature et à la vraie fonction des quantités arithmétiques et algébriques est devenue presque indéracinable, à cause de l'usage invétéré du mot « quantité » pour désigner indistinctement les objets étendus ou les formes de l'étendue, et les unités ou agrégats numériques abstraits au moyen desquels on en détermine les relations numériques. L'effet produit par ce langage équivoque est une nouvelle preuve de ce fait bien connu que les mots réagissent puissamment sur les pensées des hommes, et par

1. Peacock, *Symbolical Algebra*, p. 59.

cette réaction produisent des erreurs et une confusion incalculables. Il ne faut pas espérer d'ailleurs qu'après un si long usage les mathématiciens cessent d'appeler « quantités » les symboles arithmétiques ou algébriques ; mais il est peut-être permis de croire qu'ils reviendront à l'ancienne expression : « grandeurs géométriques (et autres) ». Le mal n'est pas tant dans l'usage quelconque d'un mot particulier que dans l'emploi d'un même mot pour désigner des objets différents les uns des autres *toto genere*¹.

L'ignorance ou l'oubli de la distinction indiquée ici explique aussi une phase historique de l'erreur dont nous avons, à plusieurs reprises, rencontré des exemples dans les pages qui précèdent : la confusion entre les formes purement conventionnelles de la pensée et du langage et les formes ou lois de l'existence objective. Cette confusion, sert de base à cette vieille croyance que nos classifications arbitraires ou conventionnelles des phénomènes naturels coïncident avec des distinctions essentielles entre eux, et peuvent être une source d'inférences sur leur nature et leur origine, — n'a-t-on pas poussé l'idée jusqu'à dire qu'il y a des barres de mesure dans la création de Dieu comme dans la Création de Haydn² ? — Une pareille confusion, devait nécessairement produire une série interminable de préjugés imaginaires et entraver ainsi sans cesse le progrès de la science.

Pour les motifs ici exposés, l'expression « nombres abstraits et concrets » n'est propre qu'à tromper. Les nombres, par eux-mêmes, sont essentiellement abstraits. En un autre sens, ils sont nécessairement concrets : ils représentent toujours quelque objet, relation ou opération particuliers. Ils ne sont rien en eux-mêmes. Cette remarque est doublement vraie des symboles algébriques, que l'on doit tout d'abord interpréter en leur assignant des valeurs numériques particu-

1. Les difficultés occasionnées par l'usage de termes impropres et trompeurs en mathématiques sont signalées par Gauss lui-même dans la notice déjà citée (Werke, vol. II, p. 178), où il parle de l'obscurité qui se trouve dans l'interprétation des « nombres négatifs et imaginaires ». Il observe que : « Si $+1$, -1 , $\sqrt{-1}$ n'avaient pas été appelés unités positive, négative, imaginaire (ou même impossible), mais par exemple unités *directe*, *inverse*, *latérale*, cette obscurité aurait été dissipée.

2. Texte anglais : The score of the Lord's creation, like that of Haydn's Creation is crossed with bars.

lières, celles-ci, à leur tour, restant sans signification jusqu'à ce que les unités qui les constituent, soient rapportées à leurs objets, relations ou opérations propres. C'est sans doute ce que veut dire Dühring, quand il observe quelque part, dans son *Histoire des Principes de la Mécanique*, que la symbolisation algébrique est radicalement défectueuse, puisqu'elle n'exprime pas les unités numériques qui sont les coefficients essentiels de chaque symbole littéral. Il aurait pu étendre son observation en ajoutant que l'usage des lettres comme symboles algébriques, — c'est-à-dire comme représentant des nombres, — est en soi une infirmité sérieuse, mais peut-être inévitable de la notation mathématique. Par exemple, dans cette formule simple qui exprime la vitesse d'un corps en mouvement en fonction de l'espace et du temps ($v = \frac{s}{t}$), les lettres ont une tendance à suggérer au mathématicien qu'il a devant lui des représentants directs des choses ou des éléments dont il s'occupe, et non pas seulement de leurs rapports exprimables en nombres. Dans toute opération algébrique, l'usage des lettres obscurcit la nature réelle de la marche et des résultats; il tend à fortifier les préjugés ontologiques.

La vraie théorie des relations entre les quantités et grandeurs étendues arithmétiques ou algébriques a été formulée depuis longtemps, en Allemagne par Martin Ohm et en Angleterre par George Peacock (le Doyen d'Ely), Augustus de Morgan, D. F. Gregory, et autres. Mais les écrits de ces penseurs ont fait peu d'impression sur les mathématiciens contemporains et postérieurs. Ceci est particulièrement visible dans les livres ou articles qui exposent la théorie des « quantités imaginaires » et des « nombres complexes » et les fondements du calcul des quaternions. L'immense extension qu'a prise l'analyse, depuis que Descartes a étendu l'algèbre à la détermination des grandeurs géométriques, est presque universellement attribuée à la connaissance croissante du vrai caractère des « quantités arithmétiques », et à une explication progressive des éléments essentiels impliqués dans le nombre. On suppose que la négation par Euclide de l'existence de rapports numériques entre les quantités incommensurables, — aussi bien que les protestations des anciens arithméticiens et algébristes occidentaux contre les

nombres négatifs ou irrationnels comme « *numeri absurdi infra nil* » ou « *numeri ficti* », ou le nom donné par Girolamo Cardano aux racines négatives d'une équation de « *æstimationes fictæ* » représentant des solutions « *vere sophisticæ* », — sont tout simplement la preuve de l'ignorance de ces divers écrivains sur la nature réelle des nombres. Il n'est pas rare de rencontrer, dans les traités sur la théorie des « nombres complexes », ce dogme que l'algèbre et l'arithmétique sont essentiellement linéaires, la numération n'étant possible que par progression, à pas égaux, dans la direction de la ligne droite¹. Et j'ajouterai : on rencontre souvent cette croyance que la métagéométrie est un progrès sur les vieilles doctrines concernant les relations entre les formes géométriques dans l'espace ordinaire, comme le calcul des quaternions constitue un progrès sur la géométrie analytique ordinaire.

Au point où nous a conduits la discussion précédente, le lecteur est, je l'espère, en état de comprendre la grande absurdité fondamentale de l'effort fait par Riemann pour tirer des inférences sur la nature de l'espace et de l'étendue, en partant des représentations algébriques des « multiplicités ». Un multiple algébrique et une grandeur d'espace sont tout à fait hétérogènes. Que l'on ne puisse tirer des formes des fonctions algébriques aucune conclusion sur les formes de l'étendue ou les grandeurs spatiales, c'est une vérité évidente découlant des considérations les plus élémentaires. La même formule algébrique peut désigner les choses les plus variables. Les équations du second degré, par exemple, peuvent représenter soit des aires géométriques, soit des courbes géométriques. L'équation $y = x^2$ peut représenter soit l'aire d'un carré dont le côté est x , soit une parabole (par rapport à un axe d'ordonnées) dont le paramètre est 1. Si l'argument de Riemann était réellement valide, il pourrait être présenté sous une forme à la fois très succincte et très simple. Il ne serait rien de plus qu'une suggestion de l'idée suivante : puisque les quantités algébriques du premier, du second et du troisième degré représentent des grandeurs de une, deux et trois dimensions, il doit y avoir des grandeurs géométriques de quatre, cinq, six, etc., dimensions, correspondant aux

1. Cf. Riecke, *Die Rechnung mit Richtungszahlen* (Stuttgart, 1856).

quantités algébriques du quatrième, cinquième, sixième, etc., degré¹.

Il est à peine nécessaire de dire, après tout ceci, que l'argument analytique en faveur de l'existence ou de la possibilité de l'espace transcendental est un nouvel exemple flagrant de la réification des concepts.

1. Il n'est pas inutile de remarquer, ici, que l'usage de lire x^2 et x^3 , x carré et x cube, au lieu de x de la seconde et de la troisième puissance, repose sur la supposition, tacite ou expresse, qu'une quantité algébrique a une signification géométrique inhérente. Cet usage est donc trompeur et devrait être abandonné. *Principiis obsta!*

CHAPITRE XV

L'HYPOTHÈSE DE LA NÉBULEUSE

SPÉCULATIONS COSMOLOGIQUES ET COSMOGÉNÉTIQUES

Comme toutes les théories métaphysiques, la théorie atomo-mécanique a sa cosmogonie. Toutes les cosmogonies métaphysiques sont des tentatives pour déduire l'univers et ses phénomènes d'un ou plusieurs éléments primordiaux par l'application de quelques principes généraux. La cosmogonie de la théorie atomo-mécanique est une tentative pour déduire l'univers et ses phénomènes des éléments de masse et de mouvement, par l'application des principes mécaniques exprimant les lois simples du mouvement. Comme on l'a montré, le problème ultime de la théorie atomo-mécanique, — dont les physiciens d'aujourd'hui attendent avec un plus ou moins haut degré de confiance la solution complète et effective, quoique beaucoup d'eux soient assez clairvoyants pour regarder comme une aspiration qui ne sera jamais réalisée — c'est de faire voir que tous les phénomènes vitaux et organiques sont des résultats de l'action chimique et physique, et que tous ceux de l'action chimique et physique à leur tour sont des changements et des transports de mouvement mécanique entre des éléments de masse constants et uniformes.

Comme préliminaire indispensable aux spéculations cosmologiques de toute espèce, les mathématiciens et les physiciens ont longuement, et depuis longtemps, débattu la question relative à la finité ou infinité de l'univers relativement

au temps, à l'espace et à la masse¹. Une cosmogonie digne de ce nom implique nécessairement cette présomption que l'univers est fini dans le temps passé au moins, car c'est une théorie sur l'origine et le commencement de l'univers. Le théoricien cosmogénétique regarde en arrière, soit vers le néant absolu, soit vers un état d'uniformité physique complètement dépourvu de ces différences et changements phénoménaux qui sont les conditions essentielles de la notion du temps. Cette présomption cosmogénétique universelle de la durée finie de l'univers dans le passé a été récemment complétée par l'affirmation de sa durée limitée dans l'avenir — assertion fondée sur une variété de considérations physiques dont la plus remarquable est la doctrine de la dissipation progressive de l'énergie. Cette doctrine a été formulée sous la forme la plus intelligible, peut-être, par sir William Thomson² : elle est contenue dans les propositions suivantes :

« 1. — Il y a maintenant dans le monde matériel une tendance universelle à la dissipation de l'énergie mécanique.

» 2. — Toute restitution d'énergie mécanique, sans une dissipation plus qu'équivalente, est impossible dans les processus matériels inanimés et n'est probablement jamais effectuée par les masses matérielles douées de vie végétative ou soumises à la volonté d'une créature animée.

» 3. — A une certaine époque, la terre doit avoir été, et après une période limitée, la terre doit redevenir impropre à l'habitation des hommes tels qu'ils sont constitués aujourd'hui, à moins que des opérations n'aient été ou ne doivent être accomplies, qui sont impossibles sous les lois auxquelles sont soumises les opérations qui s'accomplissent à présent dans le monde matériel ».

Le raisonnement par lequel on arrive à ces conclusions (qui, remarquons-le en passant, sont soigneusement dans les termes, limitées à notre planète, ou au moins à notre système planétaire) c'est que, puisque toutes les opérations qui en constituent la vie et l'action de la nature, dépendent de transformations d'énergie, puisque toute transformation de ce

1. Cf. Wundt « Ueber das Kosmologische Problem », *Vierteljahrsschrift fuer wissenschaftliche Philosophie*, vol. I, p. 80 seq.

2. « On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy », *Phil. mag.*, série IV, vol. IV, p. 304 seq.

genre, conformément à la seconde loi de la thermo-dynamique, est en réalité (pour employer l'expression de P.-G. Tait) une dégradation d'un point plus élevé de transformabilité ou d'efficacité à un point moins élevé, l'effet ultime doit être une conversion de toute l'énergie du monde en chaleur et une réduction de sa température à l'uniformité absolue. Dans cet état de diffusion uniforme de la chaleur, aucune restitution d'énergie efficace n'est possible; car la chaleur ne peut être transformée en une autre forme de l'énergie qu'en passant d'un corps d'une température plus élevée à un corps d'une température plus basse¹.

Il est clair que, si la loi de la dissipation de l'énergie s'applique à l'univers en général, — c'est-à-dire, si la dynamique d'un système matériel fini peut être légitimement étendue au Cosmos considéré comme un tout infini, — l'univers doit y avoir, tôt ou tard, une fin comme il a un commencement, d'après la théorie atomo-mécanique. Les processus de la nature doivent aboutir à une complète homogénéité de ses éléments — à l'absence complète des différences et changements qui constituent l'attestation de son existence réelle ou actuelle. On a cherché à éviter cette conclusion, en supposant l'univers fini relativement à la masse, ou à l'espace, ou à l'un et à l'autre. La première impulsion dans ce sens vint probablement d'un article de W. M. Rankine², publié peu après l'apparition de celui de sir William Thomson. Dans cet article, Rankine disait que « s'il y a entre les atmosphères des corps célestes un milieu interstellaire parfaitement transparent et diathermal — c'est-à-dire incapable de convertir la lumière et la cha-

1. La doctrine de la dissipation de l'énergie a été longuement développée par Clausius qui appelle *entropie* la somme des transformations possibles de l'énergie du monde, et énonce que « l'entropie du monde tend à un maximum » (*Pogg. Ann.*, vol. CXXI, p. 4; *Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie*, vol. II, p. 44). Il est à regretter que Tait, en adoptant le mot « entropie », entreprenne de l'employer comme il le dit lui-même (*Thermo-dynamics*, § 48; *ib.*, § 178), « au sens opposé à celui que lui a donné Clausius », et que Maxwell (*Theory of Heat*, p. 186, 188) le suive. Rien n'est plus regrettable qu'un changement arbitraire dans la terminologie scientifique, et spécialement un changement délibéré du sens reçu d'un terme. Il faut ajouter que Tait ne réussit pas même dans sa tentative de retourner le sens de Clausius, et que Maxwell aussi est dans l'erreur, quand il dit que « Clausius emploie le mot (entropie) pour désigner la part d'énergie qui n'a pas d'effet. »

2. « On the Reconcentration of the Mechanical Energy of the Universe, » *Philos. Mag.* (IV), vol. IV, p. 358, seq.

leur rayonnante en chaleur fixe ou conductible, et incapable ainsi d'acquérir une température quelconque — et si ce milieu interstellaire a des bornes au-delà duquel il y a un espace vide, la chaleur rayonnante du monde sera totalement réfléchie ; elle finira par se concentrer de nouveau en foyers dans lesquels une étoile (c'est-à-dire une masse éteinte de composés inertes) se vaporiserait et se résoudrait en ses éléments : un magasin de force chimique serait ainsi reproduit aux dépens d'une quantité correspondante de chaleur rayonnante ».

La supposition de la finité de la masse de l'univers n'était pas nouvelle ; elle avait souvent été faite auparavant. Mais cette fois elle se présentait sous une forme nouvelle. Jusqu'ici on supposait que la masse, quoique limitée, était diffuse à travers l'espace illimité. Sous cette forme, l'hypothèse a même été ~~renouvelée~~ par Wüñdt, qui imagine que la finité d'une masse peut se concilier avec l'infinité de son volume en supposant un accroissement indéfiniment progressif de sa ténuité, la masse étant prise comme la somme finie d'une série convergente infinie. Rankine, au contraire, demandait au physicien d'accorder que la masse de l'univers est finie aussi en étendue et qu'elle est entourée de toutes parts par l'espace vide. La conception d'un univers matériel ainsi limité dans l'espace illimité présente évidemment d'insurmontables difficultés. Aussi, beaucoup d'astronomes et de physiciens saluèrent-ils avec joie la thèse des métagéomètres d'après laquelle l'espace lui-même, quoique illimité en raison de sa courbure propre, n'est pas infini, et que, par suite, la masse de l'univers doit être finie, quoique diffuse. Cette thèse fut doublement bien venue, parce qu'elle paraissait, à première vue, fournir aussi le moyen d'échapper à une autre difficulté soulevée par les astronomes. En 1826, Olbers ¹ observa que si le nombre des corps de l'univers émettant de la chaleur et de la lumière est infini, chaque point de l'espace doit recevoir un nombre infini de rayons lumineux et caloriques, et doit, par suite être infiniment chaud et brillant. Il ajoutait, cependant, que cette conséquence pourrait être évitée en supposant une absorption de la plus grande partie de ces rayons par les

1. *Bode's astron.*, Jahrbuch, 1826, p. 110 seq. Cité par Zoellner.

corps obscurs et froids de l'espace. Mais cette échappatoire parut d'abord discutable, sur cette réflexion que les corps obscurs et froids, disséminés parmi les étoiles lumineuses, doivent rapidement atteindre le point d'incandescence, et que leur pouvoir absorbant est bientôt ainsi épuisé.

On suppose qu'il y a une difficulté analogue et encore plus grande, venant du fait de la gravitation, principalement à cause de son action instantanée. On dit qu'un univers consistant en un nombre infini de corps s'attirant les uns les autres, non seulement n'aurait pas de centre de gravité défini auquel tous les mouvements cosmiques pussent être rapportés — son centre d'attraction étant partout et par conséquent nulle part, — mais il se résoudrait en une pression (j'adopte l'expression de Wundt, quoique, peut-être, il fût plus correct de dire un *effort* infini) à chaque point de l'espace. Cette difficulté, en particulier, est présentée par Wundt comme insurmontable, tant que la masse de l'univers est considérée comme infinie; elle ne peut, selon lui, être surmontée, qu'en supposant que cette masse est limitée.

Il n'est pas nécessaire d'entrer dans un examen minutieux de la validité de ces considérations en faveur de la théorie de la finité de l'univers matériel. Quant aux deux dernières d'entre elles, relatives aux effets du rayonnement et de la gravitation, on voit facilement, et Lasswitz¹ a montré, qu'elles perdent leur force dès que nous nous rappelons que l'intensité du rayonnement et de la gravité, décroît en raison inverse du carré des distances, et que les séries infinies qui expriment les divers effets de la chaleur, de la lumière et de la gravitation sont convergentes, leur somme produisant des résultats finis. A appliquer la doctrine de la dissipation de l'énergie à un univers infini, constitue donc une tâche complètement inadmissible. Cette doctrine est, sans aucun doute, irrécusable quand on considère un système matériel fini. Un tel système doit avoir une fin, comme il a eu un commencement. Cela est vrai de tout système fini, quelle qu'en soit l'étendue. Mais cela n'est pas vrai d'un univers absolument illimité. Ni la loi de la conservation de l'énergie, ni celle de sa dissipation, ne peuvent lui être légitimement appliquées. L'univers, pris

1. Vierteljahrsschrift, f. w. P., vol. I, p. 329, seq.

comme absolument infini, n'est pas un système conservatif, et n'est, en aucun sens acceptable, soumis aux lois physiques. Nous ne pouvons pas traiter l'infini comme une chose physiquement réelle, parce que la réalité physique définie est coextensive avec l'action et la réaction; et les lois physiques ne peuvent pas lui être appliquées parce qu'elles sont des déterminations des modes de l'interaction entre des corps finis, distincts. Ce qu'on appelle l'*univers* n'est pas un corps distinct, et il n'y a pas de corps en dehors de lui avec lesquels il puisse avoir interaction. Les opérations où le terme infini est traité comme les termes finis sont aussi illégitimes en physique qu'elles le sont en mathématiques. L'infini est simplement l'expression de la relativité essentielle de toutes les choses matérielles et de leurs propriétés; il est ainsi, en un sens, inhérent à toute forme finie. Il est la base de toutes les relations qui constituent l'actualité sensible, mais il n'est pas lui-même un groupe de telles relations. Il est le fondement de toutes les actions et formes matérielles; aucun système d'éléments ou de forces ne peut exister sans lui, ou n'est connaissable sans être rapporté à lui: en ce sens, et en ce sens seulement, l'univers est nécessairement infini en masse aussi bien que dans l'espace et dans le temps.

Il en résulte que toutes les cosmogonies, qui se proposent d'être des théories sur l'origine de l'univers comme un tout absolu, à la lumière des lois physiques et dynamiques, sont fondamentalement absurdes. La seule question à laquelle une série ou un groupe de phénomènes donne légitimement naissance c'est la question de leur filiation ou de leur dépendance mutuelle et les tentatives pour franchir les bases de cette filiation et de cette dépendance mutuelle — pour déterminer les conditions d'émergence des phénomènes physiques au delà des bornes de l'espace et des limites du temps — sont aussi vaines que (pour employer l'heureuse comparaison de sir William Hamilton) la tentative de l'aigle pour sortir de l'atmosphère dans laquelle il plane, et qui peut seule le porter.

Ceci me conduit à discuter une théorie cosmogénétique, très célèbre et très généralement acceptée, sous le nom d'hypothèse de la Nébuleuse. Telle qu'elle est généralement admise aujourd'hui, cette théorie peut être brièvement formulée comme suit

A l'origine, les matériaux que l'on trouve à présent, au moins en partie, agglomérés dans les corps composant les systèmes stellaires, solaire, planétaires, satellitiques, et météoriques, étaient uniformément dispersés à travers l'espace. D'une manière quelconque, par l'action des forces cosmiques (attractives ou autres), cette matière uniformément diffuse et très atténuée vint à être divisée en vastes sphères nébuleuses qui commencèrent à tourner lentement. Cette rotation résultait peut-être de l'acte de division, ou de différences internes dans leurs densités et d'irrégularités dans leurs formes, ce qui déviait les lignes de gravitation de la direction stricte du rayon, les centres d'attraction ne coïncidant plus avec les centres de figure. A mesure que ces sphères perdaient leur chaleur, elles se contractaient ; et cette contraction conduisit à un accroissement de leurs vitesses de rotation, conformément à une loi mécanique connue sous le nom de loi de la *conservation des aires ou du moment angulaire*. Cette loi, dans son expression la plus générale, est simplement un corollaire de la loi d'inertie, d'où il résulte que ni la grandeur, ni la direction de l'axe, d'un moment angulaire résultant d'un système matériel quelconque ne peut être changé, par l'action mutuelle de ses éléments constituants ¹. Cependant, en vue de son application à une masse nébuleuse en rotation, la loi peut être formulée plus intelligiblement sous la forme suivante : quel que soit le changement de volume ou de forme produit dans un système matériel par l'attraction mutuelle de ses éléments constituants, la somme de toutes les aires décrites par les rayons vecteurs des divers éléments ou des particules autour du centre des rotations, en une unité de temps, est constante. Or les aires étant proportionnelles aux carrés des diamètres, il en résulte que la vitesse angulaire s'est accrue avec une grande rapidité à mesure que la masse

1. Toutes les lois mécaniques ou dynamiques de conservation — la conservation du moment, du moment angulaire et de l'énergie — ne sont au fond (comme je l'ai déjà indiqué au chapitre VII) rien de plus que des applications du principe d'inertie à des systèmes matériels complexes. C'est le grand mérite de Poinsot d'avoir mis en lumière les analogies formelles (déjà indiquées jusqu'à un certain point dans les écrits d'Euler) entre les lois qui gouvernent les mouvements de rotation et celles qui déterminent les formes des mouvements de translation ordinaires. Il est à peine nécessaire d'ajouter que la loi de conservation des aires est, dans la forme, une généralisation de la seconde loi de Kepler.

nébuleuse se contractait. Une conséquence immédiate de cet accroissement de vitesse fut un accroissement proportionnel de la force centrifuge dans les régions équatoriales de la sphère en rotation, de sorte que cette force, avec le temps, vint à faire équilibre à la gravitation centripète, puis à la dépasser. Ceci conduisit d'abord à une contraction disproportionnée de la sphère aux pôles et à un aplatissement sphéroïdal ou forme lenticulaire de la sphère primitive, et ensuite à des détachements successifs d'anneaux ou zones équatoriaux qui d'abord tournaient autour de la masse primitive dans la direction de sa rotation originale, mais qui, — en raison de l'instabilité de tels anneaux dès qu'ils ont la moindre irrégularité de forme ou de constitution —, se brisèrent et formèrent une ou plusieurs sphères ou sphéroïdes plus petits. Ceux-ci continuèrent à tourner autour du soleil avec une vitesse presque égale à la vitesse de rotation de leurs matériaux au moment de leur détachement et conglobation. Dans la plupart des cas, probablement, la masse totale d'un tel anneau se condensait en un seul corps, c'est-à-dire en une planète, tandis que, dans quelques cas, plusieurs corps étaient formés, comme la zone des astéroïdes dans notre système planétaire. Chacune des planètes, tout en tournant autour de la masse primitive dont la condensation est supposée avoir produit le soleil, commença aussi à tourner autour d'un axe propre, la direction de sa rotation coïncidant avec celle de sa révolution. Elle fut ainsi soumise aux mêmes conditions dynamiques qui déterminaient l'évolution du système original; elle émit aussi des anneaux qui, ou bien gardaient leur forme (comme dans le cas de l'anneau de Saturne), ou formaient des corps satellitiques plus petits.

Les arguments présentés à l'appui de cette hypothèse sont si connus qu'il est à peine nécessaire de les récapituler. Ce sont, entre autres, l'existence, dans les régions stellaires, de masses nébuleuses à divers degrés de condensation; l'évidence d'un accroissement de température de la surface à l'intérieur de notre planète; la coïncidence approximative des mouvements orbitaux des diverses planètes, en direction et en plan, et en outre la coïncidence approximative de ce mouvement orbital avec la direction et le plan de rotation du soleil; la coïncidence analogue des directions des mouvements orbitaux

des satellites avec les mouvements des planètes autour de leurs axes ; la forme sphéroïdale aplatie de la terre, et, autant que nous pouvons le savoir, des autres planètes, forme que M. Plateau a démontrée, non seulement théoriquement, mais aussi expérimentalement être la forme que prend nécessairement un corps en rotation à l'état liquide ou semi-liquide. Ces considérations furent émises, presque dans le même ordre et sous la même forme, par Kant et Laplace ; depuis elles ont été complétées par une infinité d'autres considérations plus ou moins plausibles, parmi lesquelles on peut mentionner l'accord des conséquences théoriques de ce fait, que la projection des masses planétaires par le globe originel doit s'être produite avec une rapidité toujours croissante à mesure que la contraction du globe progressait, avec certains caractères bien connus de notre système planétaire. Des tentatives non entièrement infructueuses ont même été faites pour déduire des éléments de cette théorie la loi empirique relative aux distances des diverses planètes au soleil, loi connue sous le nom de loi de Bode ou de Titius.

L'hypothèse de la nébuleuse, comme théorie de l'origine, non seulement de notre système planétaire, mais des systèmes stellaires ou planétaires de tout l'univers, est communément attribuée à Laplace. Sans qu'il le sût, paraît-il, l'hypothèse qu'il avançait avait été déjà conçue et publiée par le philosophe Kant dans son *Histoire naturelle du ciel*, en 1755, près d'un demi-siècle avant l'apparition de l'*Exposition du système du monde*, en 1796. Mais la vérité est que l'hypothèse de la nébuleuse, sous la forme avec laquelle elle est généralement soutenue aujourd'hui, est due à Kant, et diffère en plusieurs points essentiels de l'hypothèse de Laplace. Cette dernière hypothèse est explicitement limitée à notre système planétaire, et dans les écrits de l'astronome français il n'y a rien qui indique — rien certainement dans son *Exposition du système du monde* — qu'il ait osé l'étendre à l'univers entier, comme Kant l'a fait expressément. Mais il y a une différence encore plus importante entre les hypothèses des deux penseurs. La supposition de Kant était que « tous les matériaux composant les sphères appartenant à notre monde solaire étaient, au commencement de toutes choses, résolus en leurs substances élémentaires, et remplissaient tout l'espace du sys-

tème dans lequel ces sphères se meuvent maintenant »¹. Cette supposition est commune à toutes les formes récentes de l'hypothèse de la nébuleuse qui sont venues à ma connaissance — elles supposent toutes une diffusion de la masse entière du soleil, des planètes, des comètes et des satellites qui constituent notre système planétaire, à travers l'espace planétaire. La supposition de Laplace, au contraire, est simplement que *l'atmosphère du soleil* s'est primitivement étendue au delà des orbites de toutes les planètes, et que la formation des planètes et de leurs satellites aussi bien que celle des comètes était due à un refroidissement et une contraction graduels de cette atmosphère².

Il est à peine nécessaire de dire que la forme Laplacienne de l'hypothèse de la nébuleuse est bien trop étroite pour servir les desseins d'une théorie cosmologique générale. Une telle théorie exige que l'on fasse dériver ces diverses concrétions de matières cosmiques de quelque masse homogène primitive. Cette exigence est satisfaite par l'hypothèse de Kant; mais elle ne l'est que partiellement, si elle l'est, par celle de Laplace. Et ceci nous met en présence d'une difficulté formidable. Il est à craindre que, à mesure qu'elle augmente ses dimensions cosmogénétiques, l'hypothèse de la nébuleuse ne perde sa validité comme théorie physique. Ce sujet fut examiné, il y a près de vingt ans, par Babinet, dans un article sur la Cosmogonie de Laplace³, où il montre que les vitesses actuelles de rotation des diverses planètes sont en fait beaucoup plus grandes que les vitesses à déduire de l'hypothèse de la nébuleuse, à l'aide de la loi de la conservation des aires, si cette hypothèse renferme la supposition d'une diffusion de

1. • Ich nehme an, dass alle Materie, daraus die Krugeln die zu unserer Sonnenwelt gehören, alle Planeten und Kometen bestehen, im Anfang aller Dinge in ihren elementarischen Grundstoff aufgeloes't, den ganzen Baum des Weltgebändes erfuehlt haben, darin jetzt diese gebildeten Koerper herumlaufen. • *Naturgeschichte des Himmels*, Kant's Werke, vol. VI, p. 93.

2. « La considération des mouvements planétaires nous conduit donc à penser qu'en vertu d'une chaleur excessive *l'atmosphère du soleil* s'est primitivement étendue au-delà des orbites de toutes les planètes et qu'elle s'est resserrée successivement jusqu'à ses limites actuelles. • *Système du monde* [2^e éd.], p. 343.

3. « Note sur un point de la Cosmogonie de Laplace », *Comptes-rendus*, vol. LII, p. 481, seq. Mon attention fut attirée vers cet article par un passage d'un intéressant petit pamphlet du D^r E. Budde, de Bonn, *Zur Kosmologie der gegenwart* (Bonn, éd. Weber, 1872) auquel j'aurai occasion de revenir plus loin.

la masse solaire elle-même à travers un espace de même étendue que notre système planétaire. « Plusieurs personnes, dit M. Babinet, ont pensé que le soleil lui-même avait été originellement dilaté au point de remplir tout l'espace maintenant occupé par les planètes, quoique Laplace mentionne expressément qu'au moment de la formation de ces corps ce fut seulement l'*atmosphère* du soleil qui eut cette vaste étendue. Nous pouvons résoudre cette question mathématiquement, en calculant d'après la durée actuelle de la rotation du soleil, qui est de vingt-cinq jours et trois dixièmes, ce que serait sa vitesse de rotation si, conservant la somme des aires décrites par tous ses points matériels, il était dilaté au point que son rayon, qui est maintenant égal à cent douze fois le rayon équatorial de la terre, devint égal à la distance de la terre au soleil ou de Neptune au soleil. Le calcul sur la première de ces bases donne une rotation de 1,162,000 jours, montant à plus de trois mille (3,181) ans. La période de révolution calculée sur la seconde base serait évidemment neuf cents fois plus grande, c'est-à-dire de plus de vingt-sept mille siècles.

» Ces nombres étant infiniment plus grands que ceux qui expriment les périodes actuelles de révolution de la Terre et de Neptune, il est évidemment impossible d'admettre que ces deux planètes se sont formées de la masse du soleil lui-même, étendue au delà des orbites planétaires. Ceci, cependant, n'exclut pas l'idée que les étoiles elles-mêmes ont été formées aux dépens d'une matière cosmique universelle douée de mouvements excessivement faibles de rotation autour du centre de gravité de chaque masse qui était en voie de formation pour devenir un soleil indépendant.

» La conclusion est que, si la masse entière du soleil avait été dilatée jusqu'aux limites du système planétaire, il aurait dû avoir un mouvement de rotation beaucoup trop faible pour rendre la force centrifuge capable de faire équilibre à la force de la gravité, au point de conduire à la séparation d'un anneau équatorial de la masse totale. »

Les désaccords ici mis en lumière entre les périodes orbitales actuelles des planètes et les périodes correspondantes trouvées par le calcul, conformément au principe de l'hypothèse nébuleuse, sont si énormes qu'il ne paraît nullement

possible d'en rendre compte en supposant une contraction progressive des orbites des diverses planètes depuis leur projection, et par suite l'accroissement de vitesse de leurs mouvements orbitaux.

Les calculs de M. Babinet ne constituent pas la seule difficulté qui embarrasse l'hypothèse de la nébuleuse, soit sous sa forme cosmogénétique générale, soit sous sa forme laplacienne spéciale. Le progrès des découvertes astronomiques a montré que plusieurs des coïncidences supposées entre les faits et l'hypothèse échouent. Ainsi, il paraît y avoir une exception à l'uniformité de direction des mouvements axiques et orbitaux des planètes et de leurs satellites dans le cas d'Uranus, qui a le plan orbital de ses satellites, presque perpendiculaire à l'écliptique, les mouvements circumplanétaires des satellites, aussi bien que le mouvement axique de la planète étant, de plus, rétrograde — fait découvert depuis longtemps par sir William Herschel et confirmé par diverses observations subséquentes. Une autre difficulté pour l'hypothèse de la nébuleuse est sortie de la découverte récente (1877), par le professeur Asaph Hall, de deux satellites de la planète Mars et de la détermination approchée de leurs distances respectives à la planète, ainsi que de leurs périodes orbitales (circumplanétaires). Il trouva que les distances des satellites intérieur et extérieur étaient respectivement trois et six fois égales au rayon de la planète, et que les périodes de rotations de ces satellites sont respectivement de 7,65 et 30,25 heures, tandis que la période de rotation de la planète (Mars) elle-même est de 24,623 heures. On vit alors *qu'un des satellites fait sa révolution autour de la planète en moins d'un tiers du temps requis pour la rotation de la planète sur son axe.*

La contradiction radicale de ce fait avec l'hypothèse de la nébuleuse est indéniable. D'après l'hypothèse en question, les mouvements orbitaux d'un satellite sont la continuation des mouvements axiques des matériaux dont les satellites sont formés; sa période orbitale devait donc être égale, au moins approximativement, à la période pendant laquelle la planète tournait sur elle-même au moment de la formation du satellite. Et cette période est nécessairement plus grande que la période de rotation présente de la planète en raison

de l'accélération produite par sa contraction subséquente.

Jusqu'à présent, les tentatives pour concilier l'anomalie ici indiquée avec les postulats essentiels de l'hypothèse de la nébuleuse, ont complètement échoué. Ces tentatives sont fondées sur deux suppositions : la *première* c'est que la période de rotation de la planète a été retardée par une action semblable à celle des marées ; la *seconde*, que les orbites des satellites ont été contractées, et leurs périodes orbitales accélérées, par la résistance de ce milieu éthéré que l'on supposait autrefois avoir abrégé la période de la comète d'Encke. Mais la première de ces suppositions, comme le Professeur John Le Conte l'a observé¹, est incapable de réduire l'anomalie, puisque le retard des marées pouvait tout au plus produire une coïncidence de la période de rotation de la planète avec la période orbitale du satellite, si l'on ne tient pas compte de ce fait que l'anomalie elle-même — l'avance continuelle du satellite intérieur sur un point donné quelconque de la planète, ou, en d'autres termes, la remorque incessante de la planète par le satellite dans la direction de la rotation de celle-ci — produit cette action de marée sous une forme qui tendrait à accélérer, au lieu de retarder, la rotation de la planète. La seconde supposition est, pour le moins, insuffisante pour rendre compte de l'anomalie, quand même l'existence très douteuse d'un milieu interstellaire et interplanétaire, capable d'offrir une résistance matérielle au mouvement planétaire, pourrait être accordée. D'ailleurs, il faut se souvenir que la contraction de l'orbite d'un satellite par suite de la résistance du milieu dans lequel le satellite se meut, ne produit pas une accélération de sa révolution aussi grande que si cette accélération était produite sous la simple action des forces gravitatives ; car l'un des effets concourants, et en réalité l'effet premier de la résistance, est de retarder le mouvement même de la révolution.

A ces diverses objections contre l'hypothèse de la nébuleuse comme théorie physique de la formation et de la constitution de l'univers, il faut d'ailleurs ajouter l'inadmissibilité fondamentale, déjà signalée, de toutes les spéculations sur l'origine de l'univers considéré comme un tout illimité. Mais à part cela, il est évidemment impossible de dériver les formes et les

1. « Mars et ses satellites », *Popular Science*, Monthly, novembre, 1879.

mouvements des systèmes stellaires et planétaires, d'une masse primordiale homogène, uniformément diffuse à travers l'espace. En premier lieu, une telle masse doit être soit en repos soit en mouvement uniforme ; et cet état de repos ou de mouvement uniforme, d'après les principes les plus élémentaires, ne pourrait être changé que par des impulsions ou des attractions étrangères. Et comme il n'y a pas de « dehors » à un Cosmos ou à un Chaos embrassant tout, l'état original de repos ou de mouvement uniforme serait nécessairement perpétuel¹. En second lieu, une telle nébuleuse serait d'une température parfaitement uniforme ; toutes les parties seraient également chaudes (ou froides), et il ne pourrait y avoir de rayonnement ni de perte de chaleur résultant d'une contraction d'une partie quelconque de la masse nébuleuse. Sa condition thermo-dynamique serait constante, pour la même raison qui établit la permanence de sa condition dynamique générale.

Les difficultés accumulées que présente l'hypothèse de la nébuleuse sont devenues assez nombreuses et commencent à être assez amplement mises en lumière pour développer une tendance à la modifier, ou à la remplacer par une autre hypothèse, qu'on peut appeler l'hypothèse de l'agglomération météorique. Cette hypothèse se recommande au physicien moderne parce qu'elle paraît être un exemple de cette doctrine générale que, pour établir la nature des agents qui ont produit un système ou une forme physique particuliers, nous devons tout d'abord examiner les agents qui concourent à les maintenir ou à les détruire — doctrine qui pourrait être résumée en une règle : *quod sustinet vel delct, formavit*. Cette doctrine n'est en effet rien de plus qu'une nouvelle formule de la vieille loi d'économie qui défend de multiplier sans nécessité les éléments et les agents d'explication. Elle a été amplement et fructueusement appliquée dans la géologie, qui maintenant s'efforce de rendre compte de toutes les phases passées de l'histoire de la terre par l'action régulière et ordinaire des forces connues qui concourent au maintien ou à la modification de sa condition présente. La théorie de l'agglomération météorique fut suggérée pour la première fois par Julius Ro-

1. Comme le dit Duchring (*Kristische Geschichte der allgemeinen Principien der Mechanik*, 2^e éd., § 131) « si jamais il y avait eu équilibre parfait entre les parties (de la masse nébuleuse), cet équilibre durerait encore ».

bert Mayer¹, et fondée sur cette réflexion que la chute annuelle considérable de masses météoriques sur la terre, prouve la circulation ou le mouvement dans notre espace planétaire d'un grand nombre de petits corps, que les grands corps comme le soleil doivent en recevoir un nombre immensément plus grand que la terre, ce nombre étant proportionné à la masse et à la surface des corps. Ces météores, selon Mayer, sont, en un sens, le combustible du soleil, et tous les corps dans le système planétaire sont sujets à s'accroître, en masse et en température par suite de leurs collisions avec eux. Or, on suppose que dans les temps astronomiquement primitifs, la proportion de ces masses météoriques avec les masses des grands corps solaires et planétaires peut avoir été beaucoup plus grande qu'elle n'est maintenant; — qu'en fait, il peut y avoir eu un temps où l'espace occupé maintenant par notre système planétaire présentait l'apparence d'une multitude de tels corps, de toutes les grandeurs, de tous les degrés de consistance agglomérés sous toutes les formes, se mouvant avec toutes les vitesses, dans toutes les directions et dans des orbites de tous les degrés d'excentricité. Ces masses se seraient consolidées, et des mouvements de rotation et de révolution auraient été engendrés dans les corps ainsi formés par leurs collisions.

Ici une question se pose : comment une théorie qui cherche à dériver le monde ordonné, symétrique, harmonieux que nous connaissons, de l'amas le plus sauvage de différences et d'anomalies originales — d'une source d'incohérence et de confusion complètes — peut-elle être faite pour rendre compte des régularités et des coïncidences dont l'explication simple et naturelle était le remarquable mérite de l'hypothèse de Laplace?

Les avocats de cette nouvelle théorie cherchent une réponse à cette question dans un appel à un principe établi depuis longtemps par Laplace lui-même. Ce principe est relatif à ce fait, qu'au milieu de toutes les perturbations causées par les attractions mutuelles des corps planétaires, il existe un plan invariable passant par le centre de gravité de tout le système,

1. Dans ses *Beitraege zur Mechanik des Himmels* (publié pour la première fois en 1848), *Mechanik der Waerme*, p. 157 seq.

auprès duquel ces corps oscillent perpétuellement avec des déviations légères de chaque côté. Si sur ce plan invariable nous projetons les aires décrites par les rayons vecteurs des divers éléments de masse dans un temps donné, et si nous multiplions chaque masse par son aire respective ainsi projetée, la somme des produits est un maximum et le degré de son accroissement est constant¹. Un tel plan existe, non seulement pour le système solaire, mais pour tout système de corps gouvernés seulement par leurs attractions mutuelles. Or, il est évident que la somme, et le degré de son accroissement, des produits des masses par les *projections* des aires décrites par leurs rayons vecteurs, sont toujours moindres que la somme, et le degré de son accroissement, des produits des masses par les rayons vecteurs eux-mêmes, puisque ces rayons (à moins qu'ils ne soient parallèles au plan) sont raccourcis par leur projection; et la différence entre ces deux sommes est en raison directe des déviations des mouvements hors de la direction de l'accroissement total, laquelle direction, pour pouvoir être déterminée, est supposée positive, la direction opposée étant d'ailleurs négative. Et toutes les fois que les divers mouvements rencontrent une résistance, quelques-unes des composantes des vitesses des masses en mouvement sont nécessairement détruites, de sorte que la différence en question est diminuée et peut même être annulée. Quand cela arrive, la valeur absolue des aires décrites par les rayons vecteurs des masses en un temps donné devient égale au maximum de leurs projections; en d'autres termes leurs plans coïncident avec le plan invariable de Laplace, ou y deviennent parallèles. De là ce principe général que les mouvements de corps constituant un système fini quelconque, quelle que soit à l'origine leur divergence de direction, tendent (excepté dans quelques cas spéciaux), à cause d'une résistance quelconque à leurs mouvements, à devenir parallèles à, ou à coïncider avec un plan invariable².

1. Cf. Laplace, *Mécanique céleste*, 1^{re} partie, livre II, chap. VII, « Des inégalités séculaires des mouvements célestes ». La théorie fut publiée pour la première fois dans le *Journal de l'École polytechnique*, 1798.

2. Les exceptions possibles à cette loi sont, d'ailleurs, les cas dans lesquels les composantes détruites sont exactement égaux et opposés. L'improbabilité de ces cas est si grande que Budde, qui formule la loi en substance comme je l'ai

Avant de laisser ce sujet, j'observerai que le principe que je viens de formuler, — et qui peut être généralisé ainsi : tous les mouvements des éléments d'un système matériel fini, dépendant de l'action mutuelle de ces éléments, tendent, sous l'influence de toute action extérieure permanente, ou de toute détermination venant du dehors, à passer de l'irrégularité et du désordre à la régularité et à l'ordre, — ce principe est, à mon avis, l'un des plus importants de tout l'ensemble de la physique théorique. Car la condition ici assignée — que les mouvements internes du système soient soumis à une action extérieure constante — est en fait inséparable de tout système matériel : il n'y a pas de système matériel qui soit à un moment quelconque soumis à l'action exclusive de ses forces internes. Il y a, par conséquent, dans toute partie définie du monde, un penchant naturel à passer de l'irrégularité à la régularité, une pente naturelle du désordre à l'ordre, une tendance inhérente du Chaos au Cosmos ; et cette tendance est la conséquence simple et directe de la relativité de toutes les formes matérielles — de ce fait que chaque tout défini est toujours une partie d'un tout plus grand, — bref, que le fini n'existe que sur un fondement infini qui recule toujours. Il est même possible que ce principe dépasse la sphère de la physique, et que, jusqu'à un certain point, il puisse avoir ses applications dans le domaine de ces sciences qui sont ordinairement désignées comme historiques. Sans doute les tentatives pour transporter les lois qui gouvernent la dépendance mutuelle des phénomènes dont les lignes de connexion sont simples et faciles à tracer (tels que les mouvements des masses inorganiques), à une classe de faits dont les relations sont compliquées et imparfaitement comprises (tels que les phénomènes de l'action organique et vitale) sont extrêmement périlleuses, et ne doivent jamais être faites sans se rapporter soigneusement à la nature et au fondement des analogies qui les suggèrent ; cependant, il est vrai qu'une grande partie du progrès qui se fait maintenant dans les diverses branches de la science est dû à de libres échanges,

formulée dans le texte (*loc. cit.*, p. 30), ne fait pas même allusion à la possibilité d'une exception.

non-seulement de résultats, mais aussi de principes et de méthodes¹.

La théorie de l'agglomération météorique aborde encore d'autres éléments du problème qu'elle veut résoudre, l'explication des caractères actuels de notre système planétaire : par exemple, la petitesse comparative des planètes les plus voisines du soleil. Le raisonnement est quelque chose comme ceci : Quelque part dans l'espace comprenant les divers mouvements des corps dont les matériaux sont en voie d'agglomération, une masse se formera probablement qui dépasse toutes les autres. Cette masse — le noyau du futur soleil du système — doit graduellement attirer dans son voisinage les périhélics de toutes les masses ou groupes de masses météoriques en mouvement. Dans cette région donc, le mouvement de tous les corps doit avoir la plus grande vitesse ; ici les météores doivent se dépasser les uns les autres avec la plus grande rapidité, et leur approche et leur agglomération doivent être très difficiles — circonstance qui empêche aussi le grossissement rapide des corps dans cette région une fois leur formation commencée. Près des confins du système, au contraire, là où les mouvements des météores sont lents, les conditions sont comparativement favorables à l'agglomération de larges masses. De même, on explique en gros ce fait que les densités des planètes sont généralement en raison inverse de leurs grosseurs. Un corps plus grand attire un météore avec plus d'intensité qu'un plus petit ; son accroissement est donc marqué par des collisions plus violentes, produisant une température plus élevée et une dilatation correspondante.

Ce n'est pas mon dessein de discuter en détail la valeur de cette théorie ou d'exprimer une opinion sur sa solidité et sa suffisance ; mais il convient de dire qu'elle me paraît con-

1. Des exemples de l'application des lois dynamiques, et, en général, des lois physiques, non seulement à l'action vitale, mais aussi à l'action psychologique, sont apportés par la récente discussion d'Avenarius, sur l'évolution de la pensée d'après le principe de moindre action (*Die Philosophie als Denken der Welt gemäss dem Princip des Kleinsten Kraftmaasses*, Leipzig, 1876), et par la discussion antérieure de Schleicher sur l'évolution du langage à la lumière de la doctrine de la sélection naturelle — ce qui, on peut le dire par parenthèse, n'est pas sans analogie avec le principe discuté dans le texte — (*Die Darwin'sche Theorie und die Sprachwissenschaft*, Weimar, 1863).

traster favorablement avec l'hypothèse de la nébuleuse, précisément à cause de l'absence de quelques-uns des caractères qui font généralement accepter cette dernière hypothèse. L'hypothèse de la nébuleuse fut acceptée facilement et presque avec enthousiasme, pour des raisons moins physiques que métaphysiques. Sa disposition à dériver le multiple de l'absolument simple, le divers de l'absolument uniforme, a sa racine dans la seconde des grandes erreurs structurales que j'ai discutées au chapitre ix — dans la supposition que le résultat abstrait d'une généralisation, c'est-à-dire un concept général, peut être pris comme point de départ de l'évolution des choses particulières subsumées sous lui. L'enthousiasme pour l'hypothèse de la nébuleuse fut donc, sous ce rapport, un reste d'ontologie. Et à un autre titre, c'était même plus que cela — c'était un retour aux anciennes traditions de l'univers ayant pour origine le néant. Le brouillard originál de l'hypothèse de la nébuleuse est supposé être d'une extrême ténuité — d'une densité inférieure à la cent millièrne partie de celle de l'hydrogène, le plus léger des corps gazeux connus au chimiste. A cause de cette subtilité éthérée, il se substituait facilement, dans les conceptions de l'esprit populaire, à l'ancien vide dont on disait que le monde était sorti, et dans l'imagination de ceux qui voyaient dans la matière une sorte de condensation de l'Esprit¹, à l'Esprit² universel et impersonnel antérieur au monde. Elle se conformait ainsi à cette supposition que, d'après toute hypothèse sur le mode de formation du monde, il doit « au commencement » avoir été « sans forme et vide », et en même temps, elle satisfaisait les mystiques élans après l'Éthéré et le « Spirituel », qui distinguent spécialement cette vaste classe de philosophes, dont la philosophie commence là où finit la pensée claire.

1. Mind.

2. Spirit.

CHAPITRE XVI

CONCLUSION

Les considérations présentées dans les pages précédentes conduisent à cette conclusion, que la théorie atomo-mécanique n'est pas et ne peut pas être la vraie base de la physique moderne. Après un examen convenable, cette théorie se montre incompétente, non seulement, comme on l'accorde généralement, pour rendre compte des phénomènes de la vie organique, mais aussi pour servir d'explication aux cas les plus ordinaires de l'action physique inorganique. Cette prétention que, — contrairement aux théories métaphysiques, — elle n'a recours à aucune supposition, et ne se sert pas d'autres éléments que des données de l'expérience sensible, se trouve complètement inadmissible. En énonçant cette conclusion, il est cependant nécessaire de se garder de deux méprises fondamentales. En premier lieu, la négation de la théorie de la constitution atomique de la matière, telle qu'elle est généralement soutenue par les physiciens et les chimistes, n'implique aucune assertion sur la constitution réelle des corps, — des composés chimiques ou des corps simples, — et certainement elle ne contient pas la thèse métaphysique de la continuité absolue de la matière. La constitution actuelle des corps particuliers doit être déterminée dans chaque cas par l'expérimentation et l'observation. Il y a, sans doute, une vaste classe de corps dont la constitution est moléculaire ; mais il n'en résulte pas que les molécules qui les composent sont des unités primordiales, invariables, existant indépendamment de, et antérieu-

rement à toute action physique, et, par suite, absolument exemptes de changement. De la structure moléculaire d'un corps, inférer, pour des raisons empiriques, l'existence permanente d'atomes ou molécules absolument immuables ou indestructibles, c'est aussi déraisonnable que d'affirmer qu'à l'origine, et antérieurement à la formation des corps organiques, il existait un nombre indéfini de cellules élémentaires, parce que tous les corps organiques ont une structure cellulaire.

En second lieu, repousser cette proposition, que toute action physique est mécanique, en ce sens qu'elle est un transport de mouvement entre des masses distinctes par collision ou choc, ce n'est pas émettre un doute sur la constance des lois physiques ou l'universalité de leur application. Ce que l'on repousse, ce n'est pas l'empire général de la loi de causation physique, mais cette doctrine que la seule forme de cette causation est le transport du mouvement par le choc des masses qui, en elles-mêmes, sont absolument inertes. Si l'action physique conforme à une loi constante et uniforme est ce qu'on appelle mécanique, alors toute action physique est, à coup sûr, mécanique.

On dira peut-être que l'action physique est complètement indéterminable, si l'on ne suppose pas la constitution atomique ou moléculaire de la matière. Ceci n'est vrai qu'en ce sens que nous sommes incapables de traiter des formes de l'action physique autrement qu'en les considérant comme des modes d'interaction entre des termes physiques distincts. L'action physique ne peut pas être soumise à la détermination quantitative sans que les éléments conceptuels de la matière soient isolés logiquement, et sans qu'on se rapporte en dernière analyse aux constantes conceptuelles, masse et énergie. Tout raisonnement discursif dépend de la formation de concepts, d'une séparation et d'un groupement intellectuels d'attributs, — en d'autres termes de la considération des phénomènes sous leurs aspects particuliers. En ce sens, la marche vers la connaissance scientifique ou autre consiste en une série de fictions logiques, qui sont aussi légitimes qu'indispensables dans les opérations de la pensée, mais dont les relations aux phénomènes, dont elles sont les représentations partielles et souvent purement symboliques, ne doivent jamais être perdues de vue. Quand les anciens Grecs cherchaient à détermi-

ner les propriétés du cercle, ils commençaient par construire un polygone dont ils divisaient les côtés jusqu'à ce qu'ils fussent supposés devenir infiniment petits; et à ce point de vue, toute ligne d'une étendue et d'une forme définie, — c'est-à-dire toute ligne capable de devenir l'objet d'une recherche mathématique, — était composée d'un nombre infini de lignes droites, infiniment petites. Mais ils trouvaient bien vite que, tandis que cette fiction leur permettait de déduire une règle pour calculer l'aire du cercle, et d'en déterminer un certain nombre de propriétés, néanmoins le cercle et son diamètre rectiligne étaient fondamentalement incommensurables, et que la quadrature du cercle était impossible. L'analyste moderne détermine de même le lieu d'une courbe par la relation de petits accroissements de coordonnées arbitraires; mais il sait fort bien que la courbe elle-même n'a rien à voir dans cette représentation arbitraire, et il affirme très catégoriquement la continuité de la courbe en différenciant ses accroissements, en en dépassant la limite; — il transforme en même temps ses coordonnées en changeant leur origine ou leur inclinaison, ou même leur système, de bilinéaires en polaires, toutes les fois qu'il le juge convenable, sans craindre le moins du monde d'affecter par là la nature de la courbe dont on discute les propriétés. L'astronome, en calculant l'attraction d'une sphère homogène sur un point matériel, commence par supposer la constitution atomique ou moléculaire de la sphère attirante, établissant une série de différences finies comme l'un des termes de son équation; mais, partant de là, il suppose la série infinie, et les différences infiniment petites, et en fait, il détruit l'échafaudage moléculaire en intégrant au lieu d'effectuer la somme d'une série de différences finies. Remarquons-le : l'astronome commence avec deux fictions — la fiction d'un « point matériel » (ce qui est, au fond, une contradiction dans les termes), de façon à isoler la force attractive et de la traiter comme procédant de la sphère seule, et la fiction des différences finies représentant la constitution moléculaire de la sphère; mais la validité de son résultat exige la suppression ultérieure de ces fictions, et le rétablissement du fait. De la même manière, le chimiste se représente les proportions en poids, dans lesquelles les substances se combinent comme des atomes d'un poids défini, et les composés qui en résultent

comme des groupes définis de semblables atomes; et ce monnayage mythique a rendu nombre de services. Mais, à part cette circonstance que les symboles sont devenus complètement inadéquates à la représentation convenable des faits, il est important de se souvenir toujours que le symbole n'est pas le fait. Newton a dérivé plusieurs des lois principales de l'optique de sa théorie corpusculaire de la lumière et de l'hypothèse des « saccades de transmission et de réflexion libres »¹. Sa théorie eut quelque temps une utilité; mais elle se trouva n'être après tout qu'une manière convenable de symboliser les phénomènes qui lui étaient familiers, et on dut l'écartier quant le phénomène de l'interférence fut observé. En 1824, Sadi Carnot déduisit la loi de l'action thermique qui porte encore son nom, d'une hypothèse sur la nature de la chaleur — (supposée par lui, comme par presque tous les physiciens de son temps, être une matière impondérable), — hypothèse que l'on sait maintenant, ou que l'on croit universellement être erronée.

Pour certains cas, comme la détermination mathématique de la pression et de la dilatation des gaz, les phénomènes thermiques trouvent une représentation convenable dans cette hypothèse qu'un corps gazeux est un groupe d'atomes ou de molécules dans un état de mouvement incessant. Quelques propriétés des gaz ont été déduites avec succès par Clausius et autres, de formules fondées sur cette hypothèse, et Maxwell a même réussi à prédire le phénomène de la cessation graduelle du mouvement oscillatoire d'un disque, par suite du frottement d'un milieu gazeux, quel que soit le degré de sa ténuité, et cette prédiction a été depuis vérifiée expérimentalement; mais ni les formules de Clausius, ni les expériences de Maxwell ne sont concluantes quant à la nature réelle d'un gaz. Qu'aucune inférence légitime sur la constitution réelle des corps et la vraie nature de l'action physique ne peut être tirée des formes sous lesquelles on trouve nécessaire ou convenable de les concevoir ou de les représenter, c'est ce que montre ce fait, que nous avons habituellement recours, non seulement dans la pensée et le langage ordinaires, mais aussi en vue de la discussion scientifique, à des modes de représentation des phénomènes fondés sur des vues

1. « Fits of easy transmission and reflection ».

et des hypothèses écartées depuis longtemps comme insoutenables. De même que nous pensons aux mouvements du soleil et des étoiles, et en parions familièrement, dans les termes de la vieille doctrine géocentrique, quoique personne aujourd'hui ne mette en doute la théorie héliocentrique, de même aussi l'astronome moderne trouverait difficile de se dispenser de fictions géométriques en soumettant ces mouvements au calcul mathématique. Les anciens épicycles même survivent dans quelques formules analytiques, au moyen desquelles ce calcul est effectué.

Le progrès de la physique théorique moderne consiste dans la réduction graduelle des diverses formes de l'action physique au principe de la conservation de l'énergie. Pour l'exposition didactique de ce principe, nous avons recours à la fiction de systèmes de molécules ou particules, dont les mouvements sont de simples fonctions des distances entre eux. Mais, comme nous l'avons vu, on voit de suite que cette fiction est en conflit avec les faits de l'expérience, quand on entreprend d'établir une disjonction absolue entre les molécules et leurs mouvements. La conservation de l'énergie serait impossible, si les éléments ultimes d'un système matériel étaient en eux-mêmes absolument inertes. Et la même chose se montre d'une manière frappante dans les tentatives récentes pour étendre le principe de la conservation de l'énergie aux phénomènes de l'action chimique. Ces tentatives ont été suggérées par cette observation que toute action chimique dépend ou au moins est accompagnée d'absorption ou de dégagement de chaleur, et que la quantité de chaleur absorbée ou dégagée en est la mesure. La détermination des phénomènes chimiques au moyen de leurs circonstances thermiques, connue jusqu'à une époque récente sous le nom de thermo-chimie, et traitée comme une partie comparative-ment insignifiante de la chimie, arrive maintenant à être regardée comme la vraie base de la chimie théorique. Les principes de cette nouvelle science ont déjà été systématisés, jusqu'à un certain point, dans plusieurs traités distincts, parmi lesquels on peut citer « *la théorie mécanique de l'affinité chimique* » de Mohr ¹, la « *Thermo-chimie* » de Nau-

1. Friedrich Mohr, *Mechanische Theorie der chemischen Affinität*, Braunschweig, 1868.

mann¹, et l' « *Essai de mécanique chimique fondée sur la thermo-chimie* », de Berthelot².

L'importance de la part qui revient à la chaleur dans les transformations chimiques fut pour la première fois distinctement réalisée par l'expression de cette loi empirique de Dulong et Petit, en 1819, que la chaleur spécifique des corps simples est inversement proportionnelle à leurs poids atomiques, ou, comme on le dit communément dans le langage de la théorie atomique, que les atomes de tous les corps simples ont la même chaleur spécifique. Quoiqu'il y ait des exceptions apparentes à cette loi (comme dans le cas du carbone, du bore et du silicium), elle tient bon dans tant de cas qu'on peut espérer d'expliquer ces exceptions sur un terrain où elles se trouveront finalement confirmer la loi; en réalité, quelque progrès dans ce sens a déjà été fait. Et Neumann, Regnault et Kopp ont montré que la loi ne s'applique pas seulement aux corps simples, mais aussi aux composés; il paraît que la chaleur spécifique d'un composé est la somme des chaleurs spécifiques de ses éléments.

La loi de Dulong et Petit, si elle était très universellement valide, conduirait à une remarquable loi de la combinaison chimique. Car elle est évidemment identique à cette proposition, que les corps simples ne se combinent qu'autant qu'ils subissent la même élévation de température dans l'acte de la combinaison. Il n'est pas improbable que, si la vraie relation de la température d'un corps à son énergie physique et chimique totale était entièrement comprise, la loi deviendrait un des principes fondamentaux de la chimie théorique.

Le résultat le plus important, après celui-là, de la recherche thermo-chimique fut cette découverte, que la nature des réactions chimiques entre différentes substances dépend des relations entre les énergies spécifiques des réactifs, telles qu'elles sont déterminées par les quantités de chaleur absorbée et dégagée dans le cours de ces réactions. On trouva que certains corps simples — l'oxygène et l'hydrogène, par exemple — se combinent facilement, et, dans des conditions convenables, spontanément, la combinaison (comme dit Berthelot) se fai-

1. Dr Alexander Naumann, *Grundriss der Thermochemie*, Braunschweig, 1869.
2. Paris, 1879.

sant directement, sans l'aide d'une énergie extrinsèque, et sans être accompagnée d'un dégagement de lumière ou de chaleur, ou des deux. De telles combinaisons sont appelées par Berthelot *exothermiques*. Elles produisent des composés qui ne peuvent être décomposés en leurs éléments que par la restitution de l'énergie perdue lors de la combinaison. D'autre part, il y a des cas de combinaison *endothermique* dans lesquels, au contraire, la combinaison est accompagnée d'une absorption, et la décomposition du composé formé, d'un dégagement de chaleur. La combinaison du carbone et du soufre, par exemple, est endothermique. Le bi-sulfure de carbone se forme en faisant passer du soufre vaporisé sur du charbon chauffé au rouge. L'union du carbone et du soufre n'est possible qu'à la condition qu'on ajoute continuellement, pendant la durée de l'opération, de la chaleur, qui est rendue quand le bisulfure se décompose en ses éléments. Les faits ici indiqués sont expliqués par le chimiste moderne d'après cette théorie, que l'affinité chimique est transformée en chaleur, l'affinité et la chaleur étant deux formes de l'énergie ; que dans les cas de combinaison exothermique, la somme des énergies spécifiques des éléments composants excède l'énergie spécifique du composé formé, tandis que dans les combinaisons endothermiques, l'énergie spécifique du composé est plus grande que la somme des énergies spécifiques des composants. Et il a été montré que, toutes les fois que nous suivions un certain nombre d'éléments ou composés à travers une série de réactions chimiques, la somme d'énergie (apparaissant avant l'absorption ou après le dégagement, sous la forme de chaleur) qui est absorbée ou dégagée, est exactement égale à la différence entre les énergies spécifiques des composés ou éléments initiaux et celles des terminaux. Il est à remarquer que cette règle s'applique, non-seulement aux cas de ce qu'on appelle composition et décomposition, mais aussi aux cas d'allotropie et de polymérisme, puisque les formes allotropiques des corps simples et les formes isomériques des composés se trouvent convertibles, les unes en les autres, par addition ou soustraction de quantités définies de chaleur.

Un troisième résultat de l'étude de la condition thermique des éléments et composés, est l'établissement de ce remarquable principe que le passage d'un corps ou système de

corps quelconque d'une condition de stabilité moindre à une condition de stabilité plus grande est toujours accompagné de dégagement de chaleur, « soit quand un tel changement est ce qu'on appelle communément combinaison, dit Od'ling, soit quand il est ce qu'on appelle décomposition » ; et que toute action chimique qui se produit sans intervention d'énergie extrinsèque, tend à produire le corps ou les corps dont la formation dégage la plus grande quantité de chaleur¹.

Cette courte esquisse indique suffisamment les faits et les généralisations d'après lesquels on propose de trouver la nouvelle théorie de la « mécanique chimique ». Jusqu'ici, on a peu fait usage de la loi de Dulong et Petit ; mais les autres résultats de l'induction expérimentale dans le domaine de la thermo-chimie sont résumés par M. Berthelot dans l'introduction de son ouvrage², comme il suit :

« 1. *Principe du travail moléculaire.* — La quantité de chaleur dégagée dans une réaction quelconque est la mesure de la quantité du travail chimique et physique accompli dans cette réaction.

» 2. *Principe de l'équivalence calorifique des transformations chimiques.* — Si un système de corps simples ou composés, pris dans des conditions déterminées, subit des changements physiques ou chimiques capables de le porter à un nouvel état, sans produire aucun effet mécanique en dehors du système, la quantité de chaleur dégagée ou absorbée par l'effet de ces changements dépend uniquement de l'état initial et de l'état final du système ; elle est la même, quels que soient la nature et l'ordre de succession des états intermédiaires.

» 3. *Principe du travail maximum.* — Tout changement

1. Une sorte d'anticipation de ce principe se trouve dans une des lois bien connues énoncées dans la première partie de ce siècle par Berthollet, dans sa *Statique chimique*, — cette loi que, toutes les fois que deux sels solubles sont mêlés dans une solution, ils se décomposent l'un l'autre, si le composé ou le mélange de composés qui en résulte est insoluble ou moins soluble que les sels mêlés. On comprendra que cette loi repose sur le principe, formulé dans le texte, du dégagement maximum de chaleur, si l'on se rapporte à ce fait que, généralement parlant, la solubilité des substances est accrue par l'application de la chaleur. Cependant la loi de Berthollet est sujette à des exceptions ; il y a des cas dans lesquels les bases solubles sont remplacées par des bases insolubles, le résultat étant néanmoins la formation de sels solubles.

2. *Mécanique chimique*, p. xxviii-xxix.

chimique effectué sans intervention d'énergie extérieure tend à produire le corps ou le système de corps qui dégage la plus grande quantité de chaleur. »

Ce troisième principe, comme Berthelot l'observe, peut aussi être formulé ainsi : « Toute réaction chimique susceptible d'être effectuée sans le concours d'un travail préliminaire et sans intervention d'énergie extrinsèque, aura nécessairement lieu toutes les fois qu'elle conduit à un dégagement de chaleur. »

La relation de ces propositions à la doctrine de la conservation de l'énergie est visible. Elles sont évidemment des applications aux phénomènes de la transformation chimique, des deux principes directeurs que cette doctrine embrasse : la première et la seconde proposition de Berthelot représentent le principe de la corrélation, de l'équivalence et de la convertibilité mutuelle des diverses formes de l'énergie, et la troisième celui de la tendance de toute énergie à se dissiper.

L'étude des changements chimiques, à la lumière de la doctrine de la conservation de l'énergie montre ces changements sous un aspect entièrement nouveau. Elle montre que la question relative à la possibilité d'une « composition » ou « décomposition » chimique, est aussi bien une question de proportionnalité définie des énergies que de proportionnalité définie des masses; que tout corps simple aussi bien que tout composé réalise une quantité distincte et invariable d'énergie ainsi qu'une quantité distincte et invariable de « matière » (c'est-à-dire masse), et que cette énergie est une partie aussi constitutive, aussi essentielle de l'existence de ce corps simple ou composé que son poids.

Et ici une question se pose : comment faut-il interpréter tout ceci, à l'aide des lois ordinaires du mouvement et des principes mécaniques en général, conformément à cette supposition que tous les phénomènes de la transformation chimique sont réductibles à des mouvements d'atomes ou éléments de masse absolument inertes? Car telle est la supposition qui sert de base à la nouvelle mécanique chimique. Naumann déclare en termes exprès, — dans l'une des premières et dans la dernière phrase de son livre, que « la chimie, dans ses formes ultimes, doit être la mécanique atomique¹. » Et Ber-

1. « *Die Chemie in der für sich zu erstrebenden Gestaltung muss sein eine Mechanik der Atome* », *Thermochemie*, p. 150.

thelot, quoiqu'il évite d'employer le mot *atomes*, n'affirme pas moins explicitement que deux données suffisent à expliquer la multiformité des substances chimiques : les masses des particules élémentaires et la nature de leur mouvement¹.

L'explication des phénomènes chimiques par la théorie de la mécanique chimique doit alors être effectuée en les réduisant aux termes de masse et de mouvement. D'après quels principes mécaniques cette réduction est-elle possible ? Le fait fondamental dont il s'agit de rendre compte est la conversion de la chaleur en énergie chimique. Mais cette conversion implique, non seulement qu'une espèce de mouvement se change en un autre, mais aussi qu'une quantité définie de ce mouvement soit confinée dans une masse déterminée. D'après la théorie mécanique, la chaleur, au moins sous la forme sous laquelle elle est généralement fournie aux corps gazeux, consiste en des mouvements rectilignes moléculaires ou atomiques, avec toutes les vitesses et dans toutes les directions concevables. L'étendue de ces mouvements n'est limitée que par la rencontre des masses qui se meuvent. Par ces rencontres, le rang, la vitesse et la direction de la course de chaque atome ou molécule sont incessamment changés. Et quelle que soit la nature de cette forme de mouvement que nous appelons énergie chimique, nous savons au moins qu'une quantité invariable et définie de ce mouvement appartient à une masse ou à un nombre d'atomes définis de toute substance donnée. Toutes les fois donc que la chaleur se convertit en énergie chimique, le mouvement ci-dessus décrit doit nécessairement être modifié de telle sorte qu'une quantité définie de ce mouvement soit mise en une sorte de synthèse ou d'union avec un nombre défini de particules. Mais cela est certainement impossible si les particules sont de pures masses inertes, dont les mouvements ne sont déterminés que par le choc d'autres masses, comme le suppose la théorie mécanique. La spécialisation ou l'individualisation du mouvement qui est

1. « La matière multiforme dont la chimie étudie la diversité obéit aux lois d'une mécanique commune... Au point de vue mécanique, deux données fondamentales caractérisent cette diversité en apparence indéfinie des substances chimiques, savoir : la masse des particules élémentaires, c'est-à-dire leur équivalent, et la nature de leurs mouvements. La connaissance de ces deux données doit suffire pour tout expliquer. » *Mécanique chimique*, tome II, p. 757.

requis, ne peut s'expliquer qu'en attribuant aux masses elles-mêmes quelque pouvoir inhérent de coercition. Même si une individualisation des mouvements calorifiques pouvait résulter mécaniquement de la collision des particules inertes — par la conversion du mouvement rectiligne en mouvement de rotation, par exemple, comme conséquence des chocs obliques — il resterait encore l'impossibilité de rendre compte de ce fait que cette conversion cesserait au moment précis où chaque atome ou molécule aurait reçu la quantité voulue d'énergie.

Après ces considérations, on s'étonne de lire dans les écrits de physiciens distingués des phrases comme celles-ci : « Les seules choses réelles dans l'univers physique sont la matière et l'énergie, et la matière est simplement passive ¹ », et « nous voyons que, puisque (à notre connaissance du moins) la matière est toujours la même, quoiqu'elle puisse être masquée dans ses diverses combinaisons, l'énergie change constamment la forme sous laquelle elle se présente. L'une est comme le Destin éternel, immuable, ou *Necessitas* des anciens, l'autre est Protée lui-même dans la variété et la rapidité de ses transformations ². »

Il est peu douteux que le principe de la conservation de l'énergie ne soit appelé à résoudre théoriquement tous les phénomènes chimiques aussi bien que physiques ; mais jusqu'ici au moins, l'effort pour exprimer les lois de l'action chimique aux termes de la masse et du mouvement ou de l'énergie cinétique a échoué en chimie comme en physique. Jusqu'à quel point est-il possible, après cela, de ramener les phénomènes de l'action chimique dans le domaine des lois mécaniques gouvernant l'interaction des solides ; il est difficile de le déterminer. Il y a cependant plusieurs faits bien connus qui paraissent indiquer que, quelle que soit la nature de l'énergie chimique, elle peut difficilement résister du choc des particules solides. Les énergies chimiques des corps simples ne sont proportionnelles ni à leurs masses, mesurées par leurs poids, ni à leurs volumes ; et leurs équivalents mécaniques sont si énormes qu'ils semblent dépourvus de toute analogie avec l'action mécanique ordinaire. En 1856,

1. *The Unseen Universe*, § 104.

2. *Ibid.*, § 103.

W. Weber et R. Kohlrausch publièrent les résultats d'une série d'investigations par lesquelles ils avaient cherché à arriver à la mesure de l'intensité d'un courant galvanique. Ils appliquèrent ces résultats à la décomposition électrolytique de l'eau, afin de déterminer l'énergie représentée dans l'union chimique de l'hydrogène et de l'oxygène. Et ils énoncèrent leur conclusion dans les termes suivants¹ : « Si toutes les particules d'hydrogène d'un milligramme d'eau contenues dans une colonne de la longueur d'un millimètre étaient attachées à un fil, les particules d'oxygène étant attachées à un autre fil, chaque fil devrait être soumis à une tension, dans une direction opposée à celle de l'autre, de 2,956 cwt. (147,830 kilogrammes) pour effectuer une décomposition de l'eau avec une vitesse d'un milligramme par seconde. » Et, en considérant les équivalents d'énergie chimique en termes d'unités de chaleur, on a trouvé que la combinaison d'un gramme d'hydrogène avec 35,5 grammes de chlore, pour former 36,5 grammes d'acide chlorhydrique est accompagnée du dégagement d'une quantité de chaleur capable d'élever d'un degré la température de 24 kilogrammes d'eau ; puisque donc, comme la chaleur requise pour élever d'un degré la température d'un kilogramme d'eau est mécaniquement équivalente à 425 kilogrammètres, la formation de 36,5 grammes d'acide chlorhydrique donne naissance à une force par laquelle un poids de 10,000 kilogrammes pourrait être levé à la hauteur d'un mètre en une seconde.

1. *Pogg. Ann.*, vol. XCIX, p. 24.

FIN.

TABLE

	Pages
INTRODUCTION DE M. C. FRIEDEL. LA THÉORIE ATOMIQUE.....	VII
PRÉFACE DE L'AUTEUR.....	XIII
CHAPITRE I. — Introduction	1
CHAPITRE II. — Premiers principes de la théorie mécanique de l'Univers.....	9
CHAPITRE III. — Les unités élémentaires de matière sont-elles égales?.....	13
CHAPITRE IV. — Les unités élémentaires de matière sont-elles absolument dures et inélastiques?	22
CHAPITRE V. — Les unités élémentaires de matière sont-elles absolument inertes?	33
CHAPITRE VI. — Toute énergie potentielle est-elle en réalité cinétique? — Histoire de la doctrine de la conservation de l'énergie.....	45
CHAPITRE VII. — La théorie de la constitution atomique de la matière.....	60
CHAPITRE VIII. — La théorie cinétique des gaz. — Conditions de la validité des hypothèses scientifiques.....	76
CHAPITRE IX. — Rapport de la pensée avec les choses. — Formation de concepts. — Théories métaphysiques.....	96
CHAPITRE X. — Caractère et origine de la théorie mécanique. — Elle est un exemple de la première et de la seconde erreurs de la métaphysique	112
CHAPITRE XI. — Caractère et origine de la théorie mécanique (suite). — Elle est un exemple de la troisième erreur radicale de la métaphysique.....	131
CHAPITRE XII. — Caractère et origine de la théorie mécanique (suite). — Elle est un exemple de la quatrième erreur radicale de la métaphysique.....	141
CHAPITRE XIII. — La géométrie non euclidienne : La théorie de la limitation absolue du monde et de l'espace. — L'hypothèse d'un maximum absolu d'existence matérielle comme complément nécessaire de l'atome, son minimum absolu. — L'ontologie en mathématiques. — La reification de l'espace. — La géométrie à quatre dimensions. — L'espace non homaloïdal (sphérique et pseudo-sphérique).....	161
CHAPITRE XIV. — L'espace métageométrique d'après Riemann.	195
CHAPITRE XV. — L'hypothèse de la nébuleuse. — Spéculations cosmologiques et cosmogénétiques.....	213
CHAPITRE XVI. — Conclusion	232

VERSAILLES, CERF ET FILS, IMPRIMEURS, RUE DUFLESSIS, 59.

AVRIL 1895

FÉLIX ALCAN, ÉDITEUR

Successeur de GERMER BAILLIÈRE et C^o

Paris. — 108, boulevard Saint-Germain. — Paris.

BIBLIOTHÈQUE
Scientifique Internationale

Publiée sous la direction de M. Émile ALGLAVE

Beaux volumes in-8, la plupart illustrés, cartonnés à l'anglaise, chaque volume. 6 fr.

QUATRE-VINGT-UN VOLUMES PARUS

Derniers Volumes publiés :

- N^{os} 77-78. **Les émules de Darwin**, par E. DE QUATREFAGES, de l'Institut. 2 vol. in-8^o avec préfaces et notices sur les travaux de l'auteur, par MM. E. PERRIER et HAMY, de l'Institut. 12 fr.
- N^o 79. **Le centre de l'Afrique, autour du Tchad**, par P. BRUNACHE, administrateur colonial. 1 vol. in-8^o avec 43 gravures et une carte 6 fr.
- N^o 80. **Les aurores polaires**, par A. ANGOT, météorologiste titulaire au Bureau central météorologique. 1 vol. in-8^o avec gravures. 6 fr.
- N^o 81. **Le pétrole, l'asphalte et le bitume, au point de vue géologique**, par A. JACCARD, professeur à l'Académie de Neuchâtel (Suisse). 1 vol. in-8^o avec 70 gravures. 6 fr.

Liste des Volumes par ordre de Matières

I. — SCIENCES SOCIALES

Introduction à la science sociale, par HERBERT SPENCER. 1 vol. in-8^o, 11^e éd. 6 fr.

Cet ouvrage d'un homme qui est assurément un des plus grands penseurs de notre époque, est une introduction à la sociologie. C'est cette œuvre qui termine le vaste monument philosophique qu'il a entrepris pour synthétiser l'ensemble de la science philosophique fondée sur les idées modernes, en partant des *premiers principes* pour arriver à leurs applications dans les sciences de plus en plus complexes.

L'auteur démontre d'abord la nécessité de cette science et en étudie la nature. Il présente ensuite celui qui veut se livrer à cette étude, contre les difficultés qu'elle présente : difficultés objectives, difficultés subjectives, intellectuelles et émotionnelles. Ces dernières sont développées dans des chapitres intitulés : Préjugés de l'éducation, préjugés du patriotisme, préjugés de classes, préjugés politiques, préjugés théologiques.

Enfin il indique la discipline à observer dans la science sociale et montre comment les études biologiques et psychologiques en sont la préface nécessaire.

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS

p. 502.

Les bases de la morale évolutionniste, par HERBERT SPENCER. 1 volume in-8° 5^e édit. 6 fr.

Aujourd'hui que les prescriptions morales perdent une partie de l'autorité qu'elles devaient à leur origine surnaturelle, la sécularisation de la morale s'impose.

Le changement que promet ou menace de produire parmi nous cet état de choses, désiré ou craint, fait de rapides progrès : ceux qui croient possible et nécessaire de remplir le vide sont donc appelés à agir en conformité avec leur foi. C'est cette pensée qui a décidé le célèbre philosophe anglais à détacher de ses *Etudes sociologiques*, ce travail dans lequel il montre la base scientifique des principes du bien et du mal qui dirigent la conduite des hommes.

Les conflits de la science et de la religion, par DRAPER, professeur à l'Université de New-York. 1 vol. in-8°, 9^e édit. 6 fr.

L'histoire de la science n'est pas seulement l'histoire de ses découvertes, c'est encore celle du conflit existant entre ces deux puissances contraires : d'une part, la force expansive de l'intelligence humaine; d'autre part, la compression exercée par la foi traditionnelle et par les intérêts humains. Personne, avant Draper, n'avait traité le sujet à ce point de vue où il apparaît comme un événement actuel ou ne peut plus important. Aussi, cet ouvrage a-t-il eu un grand succès et est-il arrivé en peu d'années à sa 9^e édition.

Lois scientifiques du développement des nations dans leurs rapports avec les principes de l'hérédité et de la sélection naturelle, par W. BAGEHOT. 1 vol. in-8°, 5^e édit. 6 fr.

Livre I. L'origine des nations. — II. La lutte et le progrès. — III. La formation des peuples. — IV. L'âge de la discussion. — V. Le progrès véritable en politique.

L'évolution des mondes et des sociétés, par F.-C. DREYFUS. 1 vol. in-8°, 3^e édit. 6 fr.

M. Dreyfus s'est spécialement proposé de descendre de la nature à l'histoire et d'essayer une synthèse générale des phénomènes naturels. Il a recueilli dans le champ des phénomènes scientifiques tous ceux qui lui paraissaient utiles pour donner une idée générale de l'origine des mondes, de leur formation et de leur fin, et montrer la terre à ses diverses époques, l'apparition de l'homme et la constitution des sociétés. Pour lui, la doctrine de l'évolution, que les progrès des sciences naturelles ont établie sur une base inébranlable, a renouvelé la conception générale de l'univers physique et social; elle a mis en lumière le trait d'union entre le présent et le passé, et, en joignant le point de vue dogmatique au point de vue historique, elle a démontré l'enchaînement des époques successives que l'on considérait jusqu'ici comme n'ayant entre elles aucun rapport immédiat. (Revue bleue.)

La sociologie, par DE ROBERTY. 1 vol. in-8°, 3^e édit. 6 fr.

Ce volume n'est ni une œuvre de polémique ni un exposé dogmatique, c'est un essai de philosophie sociale où l'auteur a surtout cherché à définir la place, le caractère, la méthode et les tendances de la science toute nouvelle qui étudie les sociétés humaines avec les procédés précis des sciences naturelles. M. de Roberty se rattache à l'école positiviste d'Auguste Comte et de Littré, ce qui ne l'empêche pas de s'écarter, à l'occasion, des voies tracées par ses illustres maîtres et d'avouer une haute estime pour les doctrines de M. Herbert Spencer, même quand il les attaque un peu rudement.

La science de l'éducation, par Alex. BAIN, professeur à l'Université d'Aberdeen (Ecosse). 1 vol. in-8°, 7^e édit. 6 fr.

Dans une première partie, M. Bain examine la nature de l'éducation et ses rapports avec la physiologie, l'éducation de l'intelligence, des sens, de la mémoire et de l'imagination, la discipline. La seconde partie est consacrée aux méthodes que l'auteur étudie dans toutes les sciences et dans les différentes branches de l'éducation littéraire. Enfin, dans une troisième partie, M. A. Bain trace le plan complet d'une *éducation moderne* en rapport avec les conditions particulières des sociétés contemporaines.

La vie du langage, par WHITNEY, professeur de philosophie comparée à Yale Collège de Boston (Etats-Unis). 1 vol. in-8°, 4^e édit. 6 fr.

Les linguistes ont longtemps différé d'opinions sur la question de savoir si l'étude du langage est une branche de la physique ou de l'histoire. Ce différend est à peu près réglé maintenant : toute matière dans laquelle les circonstances, les habitudes et les

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS

actes des hommes constituent un élément prédominant, ne peut être que le sujet d'une science historique ou morale. C'est à ce point de vue que l'auteur s'est placé pour étudier la vie du langage.

La monnaie et le mécanisme de l'échange, par W. STANLEY JEVONS, professeur d'économie politique à l'Université de Londres. 1 vol. in-8°, 5^e édit. 6 fr.

L'auteur décrit les différents systèmes de monnaies anciennes ou modernes du monde entier, les matières premières employées à faire de la monnaie, la réglementation du monnayage et de la circulation, les lois naturelles qui régissent cette circulation et les divers moyens appliqués ou proposés pour la remplacer par de la monnaie de papier. Il termine par un exposé du système des chèques et des compensations, maintenant si étendu et si perfectionné, et qui a tant contribué à diminuer l'usage des espèces métalliques.

La défense des États et les camps retranchés, par le général A. BRIALMONT, inspecteur général des fortifications et du corps du génie de Belgique. 1 vol. in-8° avec nombreuses figures dans le texte et 2 planches hors texte, (4^e éd. sous presse).

Maintenant qu'en tous pays tout le monde est soldat, l'étude de la science militaire n'est plus le privilège des officiers de profession. Aussi le livre du général Brialmont sera-t-il lu avec intérêt par tous les hommes cultivés et soucieux de connaître les lois d'une des parties les plus importantes de l'art de la guerre : le rôle des places fortes et des camps retranchés pour la défense des frontières et leur importance pour assurer la sécurité des États contre les attaques de voisins trop agressifs. Le général Brialmont, inspecteur du génie belge, était mieux en situation que personne de traiter ce sujet, ayant eu à pourvoir à la défense de son pays, lequel n'a qu'à garantir sa neutralité, en cas de guerre entre les nations voisines.

II. — PHILOSOPHIE SCIENTIFIQUE

L'esprit et le corps, considérés au point de vue de leurs relations, suivi d'études sur les *Erreurs généralement répandues au sujet de l'esprit*, par Alex. BAIN, professeur à l'Université d'Aberdeen (Écosse). 1 vol. in-8°, 5^e édit. 6 fr.

Dans cet ouvrage, M. Alexandre Bain qui continue avec tant d'éclat les traditions de la philosophie écossaise, examine le grand problème de l'âme, surtout au point de vue de son action sur le corps. Il fait l'histoire de toutes les théories émises sur la nature de l'âme et sur la nature du lien qui peut l'unir au corps. Il étudie ensuite les sentiments, l'intelligence et la volonté, ce qui lui donne l'occasion d'exposer des vues fort originales, et il est conduit à indiquer une solution nouvelle du grand problème qu'il a abordé.

Les illusions des sens et de l'esprit, par James SULLY. 1 vol. in-8°, 2^e édit. 6 fr.

Cette étude embrasse le vaste domaine de l'erreur, non seulement de ces illusions des sens dont on traite dans les ouvrages d'optique physiologique et autres, mais encore des erreurs familièrement connues sous le nom d'illusions, et qui ressemblent aux premières par leur structure et leur origine. L'auteur s'est constamment tenu au point de vue strictement scientifique, c'est-à-dire à la description, à la classification des erreurs reconnues telles, qu'il explique en les rapportant à leurs conditions psychiques et physiques. C'est ainsi qu'après les illusions de la perception, il étudie celles des rêves, de l'introspection, de la pénétration, de la croyance, de l'amour-propre, de l'attente, de la mémoire, les erreurs de l'esthétique et de la poésie, etc.

Le magnétisme animal, par MM. A. BINET et Ch. FÉRÉ, médecin de Bicêtre. 1 vol. in-8°, 4^e édit. 6 fr.

Bien des phénomènes surnaturels de l'antiquité et du moyen âge étaient dus au magnétisme animal. Mesmer, à la fin du siècle dernier, fut le premier qui donna une apparence scientifique à ses expériences, et cependant le défaut de méthode chez lui et chez beaucoup de ses continuateurs fit que le *magnétisme* ne put arriver à conquérir sa place dans la science.

Les expériences de l'école de la Salpêtrière lui ont donné cette place. La délimitation précise des trois états *léthargie, catalepsie, somnambulisme*, et l'étude des phénomènes qui les accompagnent ont ouvert la voie aux médecins et aux philosophes pour l'examen des faits psychologiques et pathologiques les plus curieux.

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS

Aussi a-t-il semblé à la direction de la *Bibliothèque scientifique internationale* que le moment était venu de marquer l'état actuel de cette science; elle a confié la rédaction de ce livre à deux des élèves de M. le professeur Charcot, et de ses collaborateurs les plus assidus, qui ont pu expérimenter toutes les méthodes de magnétisme, reproduire toutes les expériences relatées par les magnétiseurs et les soumettre à une analyse critique et sévère.

Les Altérations de la Personnalité, par Alfred BINET, directeur du laboratoire de psychologie physiologique de la Sorbonne. 1 vol. in-8° avec fig. 6 fr.

Cet ouvrage ne peut manquer de piquer la curiosité du public par les faits étonnants qu'il révèle et dont il donne l'explication scientifique. M. Binet montre que le fameux *moi* indivisible de la vieille philosophie peut se dédoubler en plusieurs personnalités coexistantes ou successives parfaitement distinctes, en un mot qu'un même homme peut être à la fois plusieurs personnes. Ces faits extraordinaires, constatés scientifiquement, conduisent M. Binet à expliquer d'une manière naturelle des faits réputés miracles ou impostures, comme les phénomènes du spiritisme.

Le cerveau et ses fonctions, par J. Luys, membre de l'Académie de médecine, médecin de la Charité. 1 vol. in-8° avec 184 gravures, 7^e édit. . . . 6 fr.

Ce livre est le résumé à la fois de l'expérience personnelle de l'auteur sur la matière, et de la plupart des idées qu'il a cherché à vulgariser dans son enseignement de la Salpêtrière.

Dans une première partie purement anatomique, M. Luys expose d'abord l'ensemble des procédés techniques par lesquels il a obtenu des coupes régulières du tissu cérébral, qu'il a photographiées avec des grossissements successivement gradués, procédés qui lui ont permis de pénétrer plus avant dans les régions encore inexplorées des centres nerveux.

La seconde partie est physiologique, elle comprend la mise en valeur des appareils cérébraux préalablement analysés, et donne l'exposé physiologique des diverses propriétés fondamentales des éléments nerveux considérés comme unités histologiques vivantes. Enfin l'auteur montre comment, grâce à la combinaison, à la participation incessante, à la totalisation des énergies de tous ces éléments, le cerveau sent, se souvient et réagit.

Le cerveau et la pensée chez l'homme et chez les animaux, par CHARLTON BASTIAN, professeur à l'Université de Londres. 2 vol. in-8° avec 184 gravures dans le texte, 2^e édit. 12 fr.

M. Charlton Bastian est un des membres les plus éminents et les plus hardis de la nouvelle école philosophique qui veut ramener la psychologie aux procédés de la méthode expérimentale, et considère la science de la pensée comme la partie la plus élevée de la physiologie. Il examine successivement les différentes classes d'animaux, avant d'arriver au cerveau de l'homme, et montre la gradation de toutes les fonctions intellectuelles, au fur et à mesure qu'on monte dans l'échelle animale. Les chapitres consacrés aux singes supérieurs et à l'homme sont très curieux; dans l'intelligence humaine, l'auteur a fait une grande place à l'examen de toutes les déviations intellectuelles, et cite un grand nombre d'observations qui ne sont pas des moindres attraits du livre.

Théorie scientifique de la sensibilité : le Plaisir et la Peine, par Léon DUMONT. 1 vol. in-8°, 4^e édit. 6 fr.

INTRODUCTION : Relativité de la philosophie et des sciences. La métaphysique et la physique. Physique subjective ou psychologie. Difficultés particulières de la sensibilité.

PREMIÈRE PARTIE. *Chapitre I^{er}* : Définitions du sentiment, de l'affection, de la sensibilité, de l'émotion, de l'esthétique. — *Chapitre II* : Examen critique des théories épicuriennes, de Wolff, cartésienne, platonicienne et positiviste. — *Chapitre III* : Caractère essentiel de la peine et du plaisir. — *Chapitre IV* : Relativité de la douleur et du plaisir. — *Chapitre V* : Caractère métaphysique de la sensibilité. — *Chapitre VI* : Unité des émotions. — *Chapitre VII* : L'inconscience ou anesthésie.

DEUXIÈME PARTIE. — *Chapitre I^{er}* : Classification des émotions. — *Chapitre II* : Peines positives : effort, fatigue, laid, dégoûtant, hideux, immoral, faux. — *Chapitre III* : Peines négatives : malaise de la faiblesse, douleurs des lésions, ennui, embarras, doute, impatience, attente, chagrin, tristesse, pitié, crainte. — *Chapitre IV* : Plaisirs négatifs, repos, gaieté, etc. — *Chapitre V* : Plaisirs positifs : occupations, méditations, jeux, farniente, passe-temps. Plaisirs du goût : l'esprit, le sublime et l'admiration, le beau (beauté plastique, pittoresque, grâce des mouvements, mélodie et harmonie, rhétorique et poétique, beauté morale), le visible. Plaisir du cœur : joie, espérance. — *Chapitre*

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS

VI: L'expression des émotions chez l'homme et les animaux, la théorie de Darwin, les habitudes utiles, la force nerveuse. — *Chapitre VII*: La contagion des émotions. — *Chapitre VIII*: Influence des émotions sur la volonté, l'amour du plaisir. — *Chapitre IX*: Production volontaire de cause de plaisir. L'art.

Le crime et la folie, par H. MAUDSLEY, professeur à l'Université de Londres. 1 vol. in-8°, 6^e édit. 6 fr.

INTRODUCTION: *Chapitre I^{er}*: Les fous dans les asiles, méthode à suivre dans l'étude de la folie. — *Chapitre II*: La zone mitoyenne; il n'y a pas de ligne de démarcation nette entre la santé et l'insanité. — *Chapitre III*: Des différentes formes de l'aliénation mentale. — *Chapitre IV*: La loi et la folie. — *Chapitre V*: De la folie partielle: 1^o Folie affective. (a) Folie impulsive, (b) folie morale. — *Chapitre VI*: De la folie partielle: 2^o folie partielle intellectuelle ou folie des idées. — *Chapitre VII*: De la folie épileptique. — *Chapitre VIII*: De la démence sénile. — *Chapitre IX*: Des moyens de se préserver de la folie.

III. — PHYSIOLOGIE

Les virus, par le Dr ARLOING, membre correspondant de l'Institut, directeur de l'École vétérinaire et professeur à la Faculté de médecine de Lyon. 1 vol. in-8° avec 47 grav. dans le texte. 6 fr.

La théorie des microbes est en train de renouveler la médecine tout entière en même temps que la physiologie, sous l'impulsion donnée par M. Pasteur et M. Chauveau. M. Arloing étudie l'organisme dans la lutte avec les microbes, éléments actifs des virus; il montre le malade succombant ou résistant et acquérant alors d'ordinaire une immunité spéciale contre le retour du mal qui l'a touché une première fois. Il étudie ensuite les différents moyens de produire chez l'homme cette immunité contre les terribles maladies qui sont le fléau de notre espèce, depuis la variole jusqu'à la rage et à la phthisie. Il termine par une critique des travaux de Koch sur la fameuse lymphé préservatrice de la tuberculose, qui a tant passionné le monde.

Les sensations internes, par H. BEAUNIS, professeur de physiologie à la Faculté de médecine de Nancy, directeur du laboratoire de psychologie physiologique à l'École des hautes études (Sorbonne). 1 vol. in-8°. 6 fr.

Sous ce nom, l'auteur comprend toutes les sensations qui arrivent à la conscience par une autre voie que les cinq sens spéciaux. Il est ainsi amené à examiner les manifestations suivantes: *la sensibilité organique*, c'est-à-dire la sensibilité des tissus et organes, à l'exclusion des organes des sens; *les besoins* (besoins d'activité musculaire ou psychique, des fonctions digestives, de sommeil, de repos, etc.); *les sensations fonctionnelles* (respiratoires, circulatoires, etc.), *le sentiment de l'existence*, *les sensations émotionnelles*, les sensations de nature indéterminée, comme le sens de l'orientation, de la pensée, de la durée, *la douleur et le plaisir*.

Physiologie des exercices du corps, par le docteur Fernand LAGRANGE. 1 vol. in-8°, 6^e édit. 6 fr.

M. Lagrange a écrit sous ce titre un livre tout à fait original dont on ne saurait trop recommander la lecture. Il examine avec de très grands détails le travail musculaire, la fatigue, la cause de l'essoufflement, de la courbature, le surmenage, l'accoutumance au travail, l'entraînement, les différents exercices et leurs influences, les exercices qui déforment et ne déforment pas le corps, le rôle du cerveau dans l'exercice, l'automatisme. Certains chapitres sur les dépôts uratiques, sur le rôle du travail musculaire dans la production des sédiments, sont très fouillés. M. Lagrange a observé par lui-même, et l'on voit qu'il s'est rendu maître d'un sujet peu exploré et difficile. Tous les faibles, les débilités par l'air et la vie des grandes villes, ont intérêt à méditer cet excellent traité de physiologie spéciale. (Les Débats.)

Les sens, par BERNSTEIN, professeur à l'Université de Hall. 1 vol. in-8° avec 91 fig. dans le texte, 3^e édit. 6 fr.

Cet ouvrage expose une des parties de la physiologie qui ont le privilège d'intéresser le plus vivement tout le monde, et, en même temps, une de celles qui ont fait les progrès les plus importants dans ces dernières années.

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS

Il est divisé en quatre livres : le premier est consacré au sens du toucher sous ses différentes formes; le second, consacré au sens de la vue, contient une étude détaillée de la constitution et du fonctionnement de l'œil et de toutes les maladies qu'il peut subir; le troisième traite du sens de l'ouïe et le quatrième termine l'ouvrage par l'étude de l'odorat et du goût.

Les organes de la parole et leur emploi pour la formation des sons du langage, par H. DE MEYER, professeur à l'Université de Zurich; traduit de l'allemand et précédé d'une introduction sur l'*Enseignement de la parole aux sourds-muets*, par M. O. CLAVEAU, inspecteur général des établissements de bienfaisance. 1 vol. in-8° avec 51 gravures dans le texte. 6 fr.

L'étude de la structure et des dispositions des organes de la parole s'impose aux philosophes avec un caractère de nécessité qui devient de jour en jour plus marqué; chaque jour, en effet, on voit s'affermir cette conviction qu'une intelligence exacte des lois relatives à la modification des éléments du langage ne peut s'acquérir sans le secours des lois physiologiques de la production des sons.

La physionomie et l'expression des sentiments, par P. MANTEGAZZA professeur au Muséum d'histoire naturelle de Florence. 1 vol. in-8° avec gravures et 8 planches hors texte, 2° édit. 6 fr.

Ce livre est une page de psychologie, une étude sur le visage et sur la mimique humaine. L'auteur s'est donné pour tâche de séparer nettement les observations positives de toutes les divinations hardies qui ont jusqu'ici encombré la voie de ces études.

Scientifique dans le fonds, l'ouvrage de M. Mantegazza est cependant d'une lecture agréable; le psychologue et l'artiste y trouveront beaucoup de faits nouveaux et des interprétations ingénieuses d'observations que chacun pourra vérifier.

Les nerfs et les muscles, par J. ROSENTHAL, professeur de physiologie à l'Université d'Erlangen (Bavière). 1 vol. in-8° avec 75 fig. 3° édit. (*épuisé*).

Cet essai d'exposition de la physiologie générale des muscles et des nerfs, considérés seulement dans leur action réciproque, est une idée nouvelle; il intéresse non seulement le physiologiste, mais encore le physicien, le psychologue et tous les hommes instruits.

Les questions traitées sont comprises dans trois grandes divisions : 1° *Propriétés générales des muscles et des nerfs*, le mouvement chez les êtres vivants, constitutions des muscles, contraction musculaire, source de la force musculaire, constitution du système musculaire, les nerfs et l'irritabilité nerveuse; 2° *Électricité des muscles et des nerfs*, l'électricité animale et son étude, théorie de l'électricité animale; 3° *Organisation du système nerveux*, théorie de l'action motrice, les cellules nerveuses, les sensations.

La machine animale, par E.-J. MAREY, membre de l'Institut, professeur au Collège de France. 1 vol. in-8° avec 117 fig. dans le texte, 5° édit. augmentée. 6 fr.

Bien souvent, et à toutes les époques, on a comparé les êtres vivants aux machines; mais c'est de nos jours que l'on peut comprendre la portée et la justesse de cette comparaison. Le savant professeur du Collège de France, grâce à ses ingénieux appareils, a pu faire enregistrer automatiquement, par l'homme ou par les animaux, tous les actes de leurs mouvements. La *locomotion terrestre* et la *locomotion aérienne* ont été l'objet de ses principales recherches.

L'adaptation des organes du mouvement chez les animaux à leurs diverses conditions d'existence, les allures chez l'homme et chez le cheval, l'analyse du mécanisme du vol des insectes et des oiseaux, l'appareil reproduisant les mouvements des ailes : tels sont les principaux sujets traités dans ce livre.

Il n'est pas besoin d'insister sur les applications utiles de ces recherches scientifiques, lesquelles ont d'ailleurs valu à leur auteur le grand prix de physiologie de dix mille francs, fondé par M. Lacaze.

La locomotion chez les animaux (marche, natation et vol), suivi d'une étude sur l'*Histoire de la navigation aérienne*, par J.-B. PETTIGREW, professeur au Collège royal de chirurgie d'Édimbourg (Écosse). 1 vol. in-8° avec 140 fig. dans le texte, 2° édit. 6 fr.

LIVRE I. Les organes de la locomotion. — LIVRE II. La progression sur la terre. — LIVRE III. La progression sur ou dans l'eau. — LIVRE IV. La progression dans l'air. — LIVRE V. L'aéronautique.

Une partie de cet ouvrage est consacrée aux questions traitées dans la *Machine animale*, par M. Marey, avec lequel l'auteur est en désaccord sur un certain nombre de

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS

points. Il se place d'ailleurs à un point de vue différent. Il étudie la locomotion dans et par Peau, dont M. Marey ne s'est pas occupé, et donne de curieux détails sur la natation de l'homme.

Mais ce qu'il faut signaler tout particulièrement, c'est son histoire de toutes les machines et de tous les systèmes essayés pour arriver à naviguer dans l'air, depuis les montgolfières jusqu'aux machines actuelles.

La chaleur animale, par Ch. RICHER, professeur de la Faculté de médecine de Paris. 1 vol. in-8° avec de nombreux graphiques dans le texte. 6 fr.

TABLE DES MATIÈRES. — Lavoisier et la chaleur animale. — La température des mammifères et des oiseaux. — La température des animaux à sang froid. — La température normale de l'homme. — La température du corps dans les maladies. — La température après la mort. — Les muscles et la production de chaleur. — Les poisons et la température. — La calorimétrie et la production de la chaleur. — Le système nerveux et la chaleur animale. — La régularisation de la chaleur par la respiration. — La respiration et la température. — Conclusions.

IV. — ANTHROPOLOGIE

L'espèce humaine, par A. DE QUATREFAGES, membre de l'Institut, professeur au Muséum d'histoire naturelle. 1 vol. in-8°, 11^e édit. 6 fr.

« Ce livre m'a beaucoup intéressé, et il intéressera tous ceux qui le liront. Il expose avec une pleine compétence les faits et les questions. On peut n'être pas toujours de son avis, mais il fournit des éléments de discussion sur lesquels il est légitime de compter. Les diverses races humaines sont bien étudiées : l'homme fossile, cette découverte des temps modernes, n'est pas oublié. Des détails très instructifs sont donnés sur les influences du milieu et de la race, sur les acclimations, sur les croisements et sur les curieux phénomènes de l'hybridité. Le livre est dogmatique en ce sens qu'il part de la thèse de la monogénie humaine et qu'il est destiné complètement à l'établir. Je ne suis pas monogéniste ; mais je ne suis pas non plus polygéniste, du moins de la façon dont M. de Quatrefages est monogéniste... »

(E. LITTRÉ, *Philosophie positive*.)

Darwin et ses Précurseurs français, par A. DE QUATREFAGES. 1 vol. 2^e édit. 6 fr.

Les Émules de Darwin, par A. DE QUATREFAGES, précédé de notices sur la vie et les travaux de l'auteur, par MM. E. PERRIER et HAMY de l'Institut. 2 vol. 12 fr.

Les idées évolutionnistes qui, depuis un tiers de siècle, ont renouvelé toutes les sciences et même la philosophie, ont reçu évidemment de Darwin leur impulsion décisive. Mais ce n'est pas à dire que le grand naturaliste anglais ait tout inventé d'emblée. M. de Quatrefages montre dans ces ouvrages que Darwin a eu des précurseurs et des émules de premier rang, en France même. Il analyse et critique les théories de Darwin à côté de celles de ses précurseurs, Lamarck, Et. Geoffroy Saint-Hilaire, Buffon et quelques autres comme Tellamed, Robinet, Bory de Saint-Vincent. Parmi les savants qu'il cite comme émules de Darwin, nous rappellerons Wallace, Naudin, Romanes, Carl Vogt, Haeckel, Huxley, d'Omalius, d'Halley, etc.

La France préhistorique, par E. CARTAILHAC. 1 vol. in-8° avec 150 gravures dans le texte, 2^e édit. 6 fr.

En même temps que « l'esquisse des premières pages d'une histoire de France », qui remonterait jusqu'à l'apparition de l'homme sur la terre, on trouvera dans ce volume l'un des meilleurs et des plus savants résumés qu'il y ait de l'état présent de nos connaissances en matière d'archéologie préhistorique. Mais ce qui distingue surtout le livre de M. Cartailhac de tant d'autres livres sur le même sujet, c'en est le caractère uniquement et rigoureusement scientifique. Ni les conjonctures n'y sont données pour des vérités, ni les hypothèses pour des certitudes ; au contraire, M. Cartailhac s'y fait un point d'honneur de distinguer soigneusement le certain d'avec le probable, et le probable d'avec le douteux. Rien de moins ordinaire aux anthropologistes, dont l'intempérité d'affirmation n'a d'égale au monde que celle des métaphysiciens. Et c'est ce qui suffirait à recommander la *France préhistorique*, si d'ailleurs le nom de M. Cartailhac n'était assez connu pour ses heureuses découvertes, ses nombreux travaux, et sa rare compétence.

(Revue des Deux Mondes.)

L'homme préhistorique, étudié d'après les monuments et les costumes retrouvés dans les différents pays d'Europe, suivi d'une *Étude sur les mœurs et coutumes des sauvages modernes*, par sir JOHN LUBBOCK, membre de la Société royale de Londres. 3^e édit. revue et augmentée avec 228 grav. dans le texte. 12 fr. Rappeler les grandes divisions de l'ouvrage montrera suffisamment son importance,

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS

tant au point de vue scientifique qu'au point de vue historique. Les principaux chapitres traitent des questions suivantes : *De l'emploi du bronze dans l'antiquité, de l'âge du bronze, de l'emploi de la pierre dans l'antiquité, monuments mégalithiques, tumuli, les anciennes habitations lacustres de la Suisse, les amas de coquilles du Danemark, les graviers des rivières; de l'ancienneté de l'homme.*

L'homme avant les métaux, par N. JOLY, correspondant de l'Institut, professeur à la Faculté des sciences de Toulouse. 4 vol. in-8° avec 150 gravures dans le texte et un frontispice, 4^e édit. 6 fr.

PREMIÈRE PARTIE. — *L'antiquité du genre humain.* — I. Les âges préhistoriques. — II. Les travaux de Boucher de Perthes. — III. Les cavernes à ossements. — IV. Les tourbières et les kjøkkenmødding, r. — V. Les habitations lacustres et les Nuraghie. — VI. Les sépultures et les dolmens. — VII. L'homme préhistorique américain. — VIII. L'homme tertiaire. — IX. Haute antiquité de l'homme.

DEUXIÈME PARTIE. — *La civilisation primitive.* — I. La vie domestique (le feu, les aliments, les vêtements, les bijoux). — II. L'industrie, les armes et les outils. — III. L'agriculture et les animaux domestiques. — IV. La navigation et le commerce. — V. Les beaux-arts. — VI. Le langage et l'écriture. — VII. La religion, l'anthropophagie et les sacrifices humains. — VIII. Portrait de l'homme quaternaire.

La famille primitive, ses origines et son développement, par C. N. STARCKE, professeur à l'Université de Copenhague. 4 vol. in-8°. 6 fr.

Cet ouvrage traite une des questions capitales de la sociologie : la *Famille primitive* et ses transformations diverses qui ont abouti au régime actuel de la famille. Dans une première partie, l'auteur examine l'organisation de la famille, de la propriété et de l'héritage chez tous les peuples primitifs ou anciens. Dans la seconde partie, il fait la théorie de la famille primitive, de son origine et de son évolution. Il étudie successivement la filiation, la polyandrie et la polygamie, le matriarcat et le patriarcat, le lévirat et le niyoga, l'hérédité et le droit d'aînesse, les formes différentes de famille dans les principales races, etc. L'origine et le régime du mariage attirent principalement son attention ; il développe soigneusement le système de l'exogamie et l'évolution du mariage. Il termine enfin par la théorie du clan, de la tribu et de la famille qui a provoqué, comme celle du mariage, bien des controverses. Ce livre est donc comme un résumé des principales questions sociales.

L'Homme dans la Nature, par P. TOPINARD. 1 vol. in-8°, avec 101 figures. 6 fr.

L'ouvrage de M. Topinard, élève, collaborateur et continuateur de Broca, se divise en deux parties distinctes. Dans la première, il expose les résultats de ses recherches personnelles sur l'anthropologie, les questions que soulève cette science, les résultats positifs qu'elle a obtenus et aussi les déceptions qu'elle a rencontrées. M. Topinard a fait preuve d'indépendance d'esprit en ne dissimulant pas les points faibles d'une œuvre dont il a été l'un des artisans avec son maître Broca. Dans la seconde partie de son ouvrage, M. Topinard reprend le cadre tracé par Huxley et par Broca il y a un quart de siècle. Notamment il expose et discute, à la lumière des derniers progrès de la science, toutes les données du grand problème de l'origine de l'homme. Malgré l'abîme profond qui sépare aujourd'hui le genre humain du reste des animaux, M. Topinard montre avec détails que l'homme est le produit d'une longue évolution commencée dans les classes inférieures des vertébrés et dont il suit toutes les phases jusqu'à l'ordre des Primates où l'Espèce humaine forme un rameau distinct.

Les Races et les Langues, par ANORÉ LEFÈVRE, professeur à l'École d'Anthropologie de Paris. 4 vol. in-8°. 6 fr.

L'auteur ne sépare pas le langage de l'organisme qui l'a produit, des êtres qui l'ont façonné à leur usage. Le langage, contre-coup sonore de la sensation, a débuté par le cri animal, cri d'émotion, cri d'appel. Varié par l'onomatopée, enrichi par la métaphore, il a évolué dans la mesure même du développement cérébral et des aptitudes intellectuelles. Tous les groupes ethniques passés en revue par l'auteur : Chinois, Ouralo-Altaïques, Dravidiens, Malais, Polynésiens, Africains, Basques, Américains, Égypto-Berbéres, Sémites, Aryas, qui sont parvenus ou se sont arrêtés aux divers stades du cycle linguistique, tous ont su mettre la parole en exacte correspondance avec leurs facultés et leurs besoins. Une grande partie de l'ouvrage est, comme de juste, consacrée à la puissante famille indo-européenne dont les nombreux idiomes ont refoulé, pour ainsi dire, et rejeté en marge de la civilisation des langues moins souples et moins bien ordonnées. Dans ses études sur le *nom*, le *verbe*, la *préposition*, sur les relations entre les *continues* (voyelles et semi-voyelles) et les *explosives* (consonnes), M. André Lefèvre a proposé des vues nouvelles et originales. Toujours il s'est inspiré de ces lignes qui terminent l'ouvrage : « Tout ensemble facteur et expression de

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS

nos progrès, créateur de la conscience et de la science, le langage relie la zoologie à l'histoire, l'anthropologie physiologique à l'anthropologie morale.»

Les peuples de l'Afrique. par R. HARTMANN, professeur à l'Université de Berlin. 1 vol. in-8° avec 93 gravures dans le texte et une carte des peuples de l'Afrique, 2^e édit. 6 fr.

Ce livre est un recueil d'études historiques, ethnographiques, physico-anthropologiques et de linguistique; mais en même temps on y trouve l'attrait du récit de l'homme qui a vécu dans ces pays mystérieux, au milieu de ces populations primitives, et qui en a rapporté des impressions personnelles. De nombreuses et belles gravures accompagnent le texte et représentent des types de tous les peuples décrits dans ce travail, ainsi que leurs habitations, leurs armes et outils, et tous les objets servant aux divers usages de la vie.

Les singes anthropoïdes, et leur organisation comparée à celle de l'homme, par R. HARTMANN, professeur à l'Université de Berlin. 1 vol in-8° avec 63 gravures dans le texte. 6 fr.

L'auteur déduit de son étude la confirmation de la proposition de Huxley qu'il y a plus de différence entre les singes les plus inférieurs et les singes les plus élevés, qu'il n'y en a entre ceux-ci et les hommes. Toutefois si, au point de vue corporel, il constate une parenté très proche entre l'homme et le singe anthropoïde, il résulte également de ses observations qu'au point de vue psychique l'abîme entre les deux est très considérable.

Le centre de l'Afrique, autour du Tchad, par P. BRUNACHE, administrateur colonial. 1 vol. in-8° avec 43 gravures dans le texte et une carte. . . . 6 fr.

M. P. Brunache, administrateur colonial, a été le second de MM. Dybowski et Maistre dans leurs missions célèbres de 1892 et de 1894; en cette qualité, il a été l'un de leurs collaborateurs les plus actifs et souvent il a dû lui-même user d'initiative dans des circonstances difficiles. Il raconte ses impressions de voyage et constate les résultats acquis dans les explorations auxquelles il a pris part; il expose en même temps ses idées sur l'influence que la France peut et doit exercer dans les régions si disputées de l'Afrique centrale. Des dessins, pris sur place par l'auteur, donnent à son travail un cachet particulier, et constituent des documents authentiques qui intéresseront tous ceux, et ils sont nombreux, qui suivent avec ardeur le progrès de notre développement en Afrique.

V. — ZOOLOGIE

L'intelligence des animaux, par G.-J. ROMANES, secrétaire de la Société Linnéenne de Londres pour la zoologie, précédée d'une préface sur l'*Evolution mentale*, par Edm. PERRIER, membre de l'Institut, professeur au Muséum d'histoire naturelle de Paris. 2 vol. in-8°, 2^e édit. 6 fr.

Cet ouvrage a été composé, presque sous les yeux de Darwin, par un des hommes qui se sont le plus scrupuleusement imprégnés de sa méthode : Georges-J. ROMANES; il étudie les manifestations de l'instinct ou de la raison chez les différentes espèces, depuis les plus inférieures jusqu'aux grands mammifères, et il rapporte avec un luxe de détails vraiment remarquable, quantité de curieuses observations.

Cet ouvrage est présenté au public français par M. Edmond Perrier, professeur au Muséum d'histoire naturelle, qui, dans une importante préface, passe en revue les phases successives par lesquelles ont passé les idées des naturalistes et des philosophes relativement aux facultés psychiques des animaux, fait ressortir ce que les idées actuelles ont de définitif, et précise la part bien large qu'elles laissent encore à l'inconnu.

La philosophie zoologique avant Darwin, par Edmond PERRIER, membre de l'Institut, professeur au Muséum d'histoire naturelle de Paris. 1 vol. in-8°, 2^e édit. 6 fr.

Le savant professeur du Jardin des plantes a traité une des parties les plus intéressantes des sciences naturelles : l'histoire des doctrines des grands zoologistes (epui, Aristote et les savants du moyen âge, Buffon, Lamarck, Geoffroy-Saint-Hilaire, Cuvier, Goethe, Oken et les philosophes de la nature, jusqu'aux hommes les plus marquant

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS

de l'époque contemporaine. L'auteur y a abordé chacun des grands problèmes que cherchent à résoudre en ce moment les sciences naturelles et a fait de ce livre un véritable résumé de la zoologie actuelle.

Descendance et Darwinisme, par O. SCHMIDT, professeur à l'Université de Strasbourg. 1 vol. in-8° avec figures, 6^e édit. 6 fr.

PRINCIPAUX CHAPITRES. — État actuel du monde animal. — Les phénomènes de la reproduction. — Développement historico-paléontologique du monde animal. — Création ou développement naturel. — La philosophie naturelle. — Lyell et la géologie moderne. — Théorie de la sélection de Darwin. — La distribution géographique des animaux éclairée par la théorie de la descendance. — L'arbre-souche des vertébrés. — L'homme.

Les mammifères dans leurs rapports avec leurs ancêtres géologiques, par O. SCHMIDT, professeur à l'Université de Strasbourg. 1 vol. in-8° avec 51 figures dans le texte. 6 fr.

Quels ont été nos ancêtres et ceux des mammifères actuels? Il n'y a pas de question scientifique qui puisse intéresser davantage le public tout entier ni prêter à des découvertes plus piquantes. C'est le sujet du livre du grand zoologiste allemand, Oscar SCHMIDT. Le principe même des doctrines darwiniennes n'est plus contesté aujourd'hui. Il faut maintenant développer leurs conséquences et tracer la généalogie des êtres vivants actuels au travers des temps géologiques. C'est ce que fait M. O. SCHMIDT pour toutes les catégories de mammifères, depuis les moins élevés jusqu'aux grands singes anthropoïdes et jusqu'à l'homme lui-même. Il termine en décrivant à grands traits l'homme de l'avenir.

L'écrevisse, Introduction à l'étude de la zoologie, par Th.-H. HUXLEY, membre de la Société royale de Londres et de l'Institut de France, professeur d'histoire naturelle à l'École royale des mines de Londres. 1 vol in-8° avec 82 fig. 6 fr.

L'auteur n'a pas voulu simplement écrire une monographie de l'écrevisse, mais montrer comment l'étude attentive de l'un des animaux les plus communs peut conduire aux généralisations les plus larges, aux problèmes les plus difficiles de la zoologie, et même de la science biologique en général. Avec ce livre, le lecteur se trouve amené à envisager face à face toutes les grandes questions zoologiques qui excitent aujourd'hui un si vif intérêt.

Les commensaux et les parasites dans le règne animal, par P.-J. VAN BENEDEN, professeur à l'Université de Louvain (Belgique). 1 vol. in-8° avec 82 fig. dans le texte, 3^e édit. 6 fr.

Cette étude de différents animaux, faite à un point de vue spécial, est remplie de détails intéressants sur leurs mœurs et leurs habitudes, et de rapprochements ingénieux. Dans une première partie, l'auteur étudie les *Commensaux*, qu'il divise en commensaux libres et commensaux fixes; dans une deuxième partie, les *Mutualistes*, c'est-à-dire ceux qui vivent ensemble en se rendant de mutuels services.

Dans la troisième partie, sont traités les *Parasites*, ainsi divisés : parasites libres à tout âge, dans le jeune âge, pendant la vieillesse; parasites à transmigrations et à métamorphoses; parasites à toutes les époques de la vie.

Une table alphabétique contenant le nom de 450 animaux environ, cités dans le cours de l'ouvrage, le termine utilement pour les recherches.

Fourmis, abeilles et guêpes, Études expérimentales sur l'organisation et les mœurs des sociétés d'insectes hyménoptères, par sir JOHN LUBBOCK, membre de la Société royale de Londres. 2 vol in-8° avec gravures dans le texte et 13 planches hors texte, dont 5 colorées. 12 fr.

Le grand naturaliste anglais, sir J. Lubbock, a publié sous ce titre le récit des curieuses expériences qu'il poursuit depuis quinze ans concurremment avec ses travaux préhistoriques.

On y trouvera notamment les détails les plus surprenants sur l'organisation du travail, les expéditions militaires, l'esclavage, le langage, les affections et les divers sentiments sociaux des fourmis qui ont été le principal objet de ses recherches.

Les sens et l'instinct chez les animaux et principalement chez les insectes, par SIR JOHN LUBBOCK. 1 vol. in-8° avec 136 grav. dans le texte. 6 fr.

Ce livre est le complément du précédent; M. Lubbock étudie successivement les cinq

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS

sens chez les animaux et les instincts dont le développement se rattache à ces sens. La principale originalité de ce livre, ce sont les nombreuses expériences imaginées par l'auteur, avec une ingéniosité et une patience sans égales, pour mettre en lumière l'intelligence et les instincts moraux ou sociaux des bêtes de tout ordre. C'est ce qui rend la lecture de ce livre aussi attachante pour les gens du monde que pour les savants.

VI. — BOTANIQUE — GÉOLOGIE

Introduction à l'étude de la botanique (*Le sapin*), par J. DE LANESSAN, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris. 1 vol. in-8° avec gravures dans le texte, 2^e édit. 6 fr.

Ce livre est une introduction générale à l'étude de la botanique. M. de Lanessan l'a écrit surtout pour les hommes instruits qui aiment à connaître les grands principes et les traits généraux des sciences qu'ils n'ont pas le temps d'approfondir, mais il rendra aussi service à ceux qui débutent dans l'étude de la botanique, en leur montrant que cette science ne se compose pas seulement de détails arides et fastidieux. En prenant comme sujet l'étude du *Sapin*, l'auteur n'a pas voulu faire une monographie de cet arbre; il s'est proposé seulement de développer par un exemple spécial les théories les plus importantes de la Botanique.

L'origine des plantes cultivées, par A. DE CANDOLLE, correspondant de l'Institut. 1 vol. in-8°, 3^e édit. 6 fr.

La question de l'origine des plantes intéresse les agriculteurs, les botanistes et même les historiens ou les philosophes qui s'occupent des commencements de la civilisation.

Le but de l'auteur, digne héritier d'un nom réputé en botanique, a été de chercher l'état et l'habitation de chaque espèce avant sa mise en culture. Il a dû, pour cela, distinguer parmi les innombrables variétés, celle qu'on peut estimer la plus ancienne, et voir de quelle région du globe elle est sortie. Il montre, en outre, comment la culture des diverses espèces s'est répandue dans différentes directions, à des époques successives.

Cet ouvrage peut être considéré comme une application des plus curieuses de la théorie de l'évolution; on y reconnaît l'adaptation des plantes aux milieux de leur développement, et même l'extension de certaines espèces, de telle façon que l'histoire des plantes cultivées se rattache d'une manière évidente aux questions les plus importantes de l'histoire générale des êtres organisés.

Les champignons, par COOKE et BERKELEY. 4 vol. in-8° avec 110 grav. 4^e édit. 6 fr.

TABLE DES CHAPITRES. — I. Nature zoologique des champignons. — II. Structure. — III. Classification. — IV. Usages. — V. Phénomènes remarquables produits par les champignons. — VI. Les spores et leur dissémination. — VII. Germination et développement. — VIII. Reproduction sexuelle. — IX. Polymorphisme. — X. Influence et effets. — XI. Habitat. — XII. Culture. — XIII. Distribution géographique. — XIV. Récolte et conservation.

L'évolution du règne végétal, par G. DE SAPORTA, correspondant de l'Institut, et MANTON, professeur à la Faculté des sciences de Marseille.

I. *Les Cryptogames*. 1 vol. in-8° avec 83 gravures dans le texte. 6 fr.
II. *Les Phanérogames*. 2 vol. in-8° avec 136 gravures dans le texte. 12 fr.

Depuis vingt ans que la théorie de Darwin a bouleversé toutes les théories scientifiques, bien des livres ont été consacrés à sa défense. Mais c'est la première fois qu'on trace dans son cadre un tableau d'ensemble du monde végétal. MM. de Saporta et Marion montrent comment la flore actuelle tout entière s'est constituée peu à peu par la transformation d'un type primitif. C'est la généalogie du règne végétal. Cet ouvrage est orné d'un grand nombre de gravures dessinées d'après nature.

Les régions invisibles du globe et des espaces célestes, par A. DAUBRÉE, membre de l'Institut. 1 vol. in-8° avec gravures. 2^e édit. 6 fr.

Livre écrit pour le grand public, dans lequel l'éminent professeur du Muséum fait l'étude des eaux souterraines, de la formation des roches sédimentaires ou cristallisées, des tremblements de terre, des météorites ou pierres tombées du ciel, etc. Les sources,

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS

les eaux minérales, les cours d'eau souterrains, le rôle minéralisateur de l'eau aux époques géologiques constituent autant de chapitres d'un vif intérêt. Les tremblements de terre et les météorites conduisent M. Daubrée à l'examen de la constitution du globe. En un mot, c'est bien, comme l'indique le titre, une excursion dans les régions de l'invisible. (Les Débats.)

Les volcans et les tremblements de terre, par FUCHS, professeur à l'Université de Heidelberg. 1 vol. in-8° avec 30 gravures et une carte en couleurs, 6^e édit. 6 fr.

Les tremblements de terre sont, pour certaines régions, une perpétuelle et terrifiante menace, aussi tout ce qui se rattache à ces convulsions terrestres a-t-il au plus haut point le privilège de susciter l'émotion et de passionner la curiosité. L'ouvrage de M. Fuchs offre à ce point de vue un intérêt des plus émouvants.

On trouvera ensuite dans ce livre un historique détaillé des tremblements de terre connus, des études sur les tremblements de mer, les volcans boueux et les geysers, une description pétrographique des laves, enfin il se termine par une description géographique des volcans, comprenant une énumération complète et tenant compte de toutes les découvertes et de tous les événements récents.

La période glaciaire, principalement en France et en Suisse, par A. FALSAN. 1 vol. in-8° avec 105 gravures dans le texte et 2 cartes hors texte. . . . 6 fr.

TABLE DES MATIÈRES. — Transport du terrain erratique. — La théorie glaciaire. — Classification des terrains et des alluvions. — Caractères physiques et puissance du terrain glaciaire ancien. — Erosion glaciaire, moraines profondes, superficielles. — Stries, roches moutonnées, etc. — Creusement des lacs. — Persistance ou conservation par la glace des lacs orographiques et des fjords. — Creusement des lacs par l'érosion glaciaire. — Affouillements et réexcavation des lacs. — Progression des lacs. — Progression des anciens glaciers. — Causes de leur extension. — Climat, flore et faune de la période glaciaire. — L'homme pendant la période glaciaire. — Description des terrains glaciaires.

Le pétrole, le bitume et l'asphalte, par A. JACCARD, professeur de géologie à l'Académie de Neuchâtel. 1 vol. in-8° avec 70 fig. dans le texte. . . 6 fr.

Le pétrole tient une place de plus en plus grande dans la vie moderne. Mais son origine et son mode de formation sont encore très discutés. M. Jaccard, l'éminent professeur de géologie de l'Académie de Neuchâtel, a consacré la plus grande partie de sa vie à l'étude de cette question, aussi importante au point de vue scientifique qu'au point de vue industriel. C'est le résultat de ses longs travaux qu'il expose dans ce volume. Il y fait l'histoire critique de toutes les théories scientifiques relatives au pétrole, décrit son mode de formation, expose la découverte successive de ses gisements dans les deux mondes. Il fait ensuite l'histoire du bitume et de l'asphalte, les congénères du pétrole. Enfin il cherche à déterminer l'avenir industriel du pétrole. De nombreuses figures placées dans le texte permettent notamment de suivre les descriptions des gisements géologiques qui ont fait la fortune de certaines régions.

VII. — PHYSIQUE

Les glaciers et les transformations de l'eau, par J. TYNDALL, professeur de chimie à l'Institution royale de Londres, suivi d'une étude sur le même sujet, par HELMHOLTZ, professeur à l'Université de Berlin. 1 vol. in-8° avec nombreuses figures dans le texte et 8 planches tirées à part sur papier teinté. 6^e édit. 6 fr.

Cet ouvrage contient la description des grands glaciers de la Suisse que M. J. Tyndall a visités et étudiés un grand nombre de fois. On y trouve exposées les théories auxquelles ont donné lieu l'origine et la nature des glaciers, la formation de la glace et du givre, la régulation découverte par Faraday, dont Tyndall défend les doctrines, tandis que Helmholtz soutient celles de MM. James et William Thomson.

La conservation de l'énergie, par BALFOUR STEWART, professeur de physique au collège Owen's de Manchester (Angleterre), suivi d'une étude sur la *Nature de la force*, par P. DE SAINT-ROBERT (de Turin). 1 vol. in-8° avec figures, 5^e édit. 6 fr.

On peut considérer l'univers comme une immense machine physique; les connaissances que nous possédons sur cette machine se divisent en deux branches : l'une d'elles embrassant ce que nous savons sur la structure de la machine elle-même; l'autre ce que nous savons sur la méthode qu'elle emploie pour agir. L'auteur étudie à la fois ces deux branches. Dans un premier chapitre, il passe en revue tout ce que nous connaissons au sujet des atomes, et donne une définition de l'énergie. Puis il énumère les diverses forces et énergies de la nature; il établit les lois de leur conser-

vation, de leur transformation et de leur dissipation. Enfin, l'ouvrage se termine par une esquisse historique du sujet, et par l'étude de la place occupée par les êtres vivants dans cet univers de l'énergie.

La matière et la physique moderne, par STALLO, précédé d'une préface par Ch. FRIEDEL, de l'Institut, professeur à la Faculté des sciences de Paris. 4 vol. in-8°, 2^e édit. 6 fr.

M. Stallo est un savant américain qui est arrivé à la science par la philosophie. Dans ce livre, il critique, au point de vue purement expérimental, les principales théories de la science contemporaine, la théorie mécanique de la chaleur, la théorie atomique, etc., enfin les surprenantes doctrines des géomètres allemands et italiens sur l'espace à quatre dimensions. M. Friedel, l'éminent professeur de la Sorbonne, a placé en tête de ce livre une préface où il prend la défense de l'École atomique dont il est le chef incontesté en France depuis la mort de Wurtz.

VIII. — CHIMIE

La synthèse chimique, par M. BERTHELOT, membre de l'Institut, professeur de Chimie organique au Collège de France. 4 vol. in-8°, 7^e édit. 6 fr.

C'est en 1860 que M. Berthelot a exposé, pour la première fois, les méthodes et les résultats généraux de la synthèse chimique appliquée aux matériaux immédiats des êtres organisés et qu'il a fait connaître au monde savant les procédés qu'il avait découverts pour réaliser les combinaisons de carbone et d'hydrogène.

Il était bon que ces principes de la synthèse organique qui ont pris une place si importante dans le domaine de la chimie et qui, chaque jour, produisent des découvertes nouvelles, fussent mis à la portée du grand public.

La théorie atomique, par Ad. WURTZ, membre de l'Institut, professeur à la Faculté des sciences et à la Faculté de médecine de Paris. 1 vol. in-8°, 6^e édit., précédé d'une introduction sur la *Vie et les travaux* de l'auteur, par Ch. FRIEDEL, de l'Institut. 6 fr.

Dans cet ouvrage, le chef de l'École atomique française, Ad. Wurtz, résume l'ensemble des travaux et des théories qui ont rendu son nom célèbre dans toute l'Europe savante. Il expose le développement successif des théories chimiques depuis Dalton, Gay-Lussac, Berzelius et Proust, jusqu'à Dumas, Laurent et Gerhardt, Avogadro, Mendeleef et Wurtz, et termine par les études les plus curieuses et les plus nouvelles sur la constitution des corps et la nature de la matière.

Les fermentations, par P. SCHUTZENBERGER, membre de l'Académie de médecine, professeur de chimie au Collège de France. 4 vol. in-8° avec fig., 5^e édit. 6 fr.

La question des *fermentations* est un des chapitres les plus intéressants de la chimie, et dont les applications industrielles, agricoles, hygiéniques et médicales sont les plus nombreuses. Il y a cependant peu de questions qui soient restées plus longtemps obscures que celles de l'origine des fermentations, et de l'action de ce que l'on appelle les ferments. Mais, dans ces dernières années, les travaux d'un grand nombre de savants, et notamment ceux de M. Pasteur, ont jeté la lumière sur cet important sujet, et ce sont tous les faits acquis aujourd'hui que M. Schutzenberger résume dans ce livre.

L'auteur a divisé son travail en deux parties : dans la première, il traite des fermentations attribuées à l'intervention d'un ferment organisé ou figuré, telles sont les fermentations alcoolique, visqueuse, lactique, ammoniacale, butyrique et par oxydation ; la seconde partie est consacrée aux fermentations provoquées par des produits solubles, élaborés par les organismes vivants.

Microbes, ferments et moisissures, par le docteur L. TROUSSART. 1 vol in-8° avec nombreuses gravures dans le texte, 2^e édit. 6 fr.

S'il est un sujet à l'ordre du jour, c'est bien celui des microbes, et, cependant, à part les livres savants de Duclaux, Sternberg, Klein, et l'important ouvrage de MM. Cornil et Babes, qui est le seul traité complet des microbes et de la bactériologie, il n'avait pas encore été traité à un point de vue pratique.

Cependant, le rôle des microbes intéressant chacun de nous, il fallait un livre où l'avocat, forcé de traiter en face d'experts une question d'hygiène, l'ingénieur, l'architecte, l'industriel, l'agriculteur, l'administrateur, pussent trouver des notions claires

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS

et précises sur les questions d'hygiène pratique se rattachant à l'étude des microbes, notions qu'ils trouveraient difficilement, dispersées qu'elles sont dans les livres destinés aux médecins ou aux botanistes de profession. Bien qu'il ne soit pas écrit spécialement pour ces derniers, ce livre peut cependant leur être d'une grande utilité.

Il a été donné une large place à la partie botanique, trop souvent négligée dans les ouvrages de pathologie microbienne.

La Révolution chimique. Lavoisier, par M. BERTHELOT. 1 vol. in-8° illustré. 6 fr.

Ce livre mérite d'attirer l'attention des gens du monde comme des philosophes et des savants. La date de 1789, qui est le point de départ de la société politique nouvelle, coïncide à peu près avec les grandes découvertes de Lavoisier qui sont la base de la science contemporaine de la physiologie comme de la chimie. A côté de la Révolution politique de 1789, il y a donc eu une révolution chimique personnifiée par Lavoisier, et qui sépare deux mondes scientifiques entièrement différents par leurs méthodes, leur esprit et leurs principes. C'est cette révolution que raconte M. Berthelot.

L'ouvrage se termine par des notices et extraits des registres inédits du laboratoire de Lavoisier qui offrent un intérêt particulier en mettant le lecteur en présence de la méthode de travail de l'illustre savant.

IX. — ASTRONOMIE — MÉCANIQUE

Les étoiles, Notions d'astronomie sidérale, par le P. A. SECCHI, directeur de l'Observatoire du Collège romain. 2 vol. in-8° avec 68 gravures dans le texte et 16 planches en noir et en couleurs, 2^e édit. 12 fr.

Cet ouvrage est une œuvre posthume, et comme le testament scientifique du célèbre directeur de l'Observatoire de Rome. Il est le résumé de ses derniers travaux ou, pour mieux dire, le résumé de l'état actuel de nos connaissances sur les étoiles.

Dans le premier volume, l'auteur, après avoir décrit l'aspect général du ciel, étudie toutes les questions qui se rattachent à la grandeur des étoiles, à la distance qui les sépare de nous, à leur couleur, à leurs changements d'éclat et de teinte. Un chapitre est consacré au soleil qui appartient à la classe des étoiles les plus intéressantes, les étoiles variables.

Le second volume comprend l'histoire des nébuleuses, l'étude et la détermination des mouvements propres des étoiles. L'auteur est ainsi conduit à traiter de l'immensité de l'espace stellaire, du nombre des étoiles, des distances qui les séparent de nous et de celles qui les séparent les unes des autres. Enfin, dans un dernier chapitre, le P. Secchi expose ses vues sur la constitution de l'univers, et c'est certainement un des plus intéressants de l'ouvrage, en raison de la grandeur de la conception de l'auteur.

Le soleil, par C.-A. YOUNG, professeur d'astronomie au Collège de New-Jersey. 1 vol. in-8° avec 87 gravures. 6 fr.

De toutes les parties de l'astronomie, l'étude de la constitution physique du soleil est celle qui a fait le plus de progrès depuis vingt ans. On peut dire qu'elle a renouvelé les idées du monde savant sur la constitution physique de l'univers tout entier. Cette étude est l'objet principal du livre du célèbre astronome américain Young.

Cet ouvrage est illustré d'un grand nombre de figures et contient à côté des doctrines modernes un exposé très curieux de toutes les recherches et de toutes les théories sur le soleil.

Histoire de la machine à vapeur, de la locomotive, et des bateaux à vapeur, par R. THURSTON, professeur de mécanique à l'Institut technique de Hoboken, près New-York, revue, annotée et augmentée d'une Introduction, par HIRSCH, ingénieur en chef des ponts et chaussées, professeur de machines à vapeur à l'École des ponts et chaussées de Paris. 2 vol. in-8° avec 160 gravures dans le texte et 16 planches tirées à part, 2^e édit. 12 fr.

On peut dire que l'industrie moderne tout entière dérive de la machine à vapeur, et cependant l'histoire de ce merveilleux engin n'avait pas encore été écrite d'une manière complète. M. Thurston, un des professeurs les plus éminents des Etats-Unis, a comblé cette lacune en donnant une *Histoire de la machine à vapeur*, revue et augmentée d'une préface par M. Hirsch, professeur de machines à vapeur à l'École des ponts et chaussées. Cet ouvrage est orné de 16 planches, d'une foule de portraits d'inventeurs, et d'une immense quantité de figures représentant tous les types de machines à vapeur, de bateaux à vapeur ou de locomotives, depuis les premières tentatives de l'antiquité jusqu'aux perfectionnements les plus récents.

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS

Les aurores polaires, par A. ANGOT, météorologiste titulaire au Bureau météorologique de France. 1 vol. in-8° avec gravures dans le texte. 6 fr.

Les aurores boréales, que M. Angot appelle avec raison aurores polaires, puisqu'elles se produisent aussi bien au pôle sud qu'au pôle nord, et descendent même de temps à autre dans les latitudes tempérées, forment l'un des sujets les plus curieux des sciences physiques. Ces merveilleuses illuminations des nuits polaires, qui prennent souvent les formes les plus fantastiques, constituent certainement un des spectacles les plus grandioses de la nature. M. Angot les décrit, en fait l'histoire, en discute la théorie avec la clarté de style et l'élégance d'exposition qui lui ont donné une place éminente dans la littérature scientifique comme dans la science technique. Des gravures, exécutées avec le plus grand soin, représentent les plus belles aurores boréales observées.

X. — BEAUX-ARTS

Le son et la musique, par P. BLASERNA, professeur à l'Université de Rome, suivi des *Causes physiologiques de l'harmonie musicale*, par H. HELMHOLTZ, professeur à l'Université de Berlin. 1 vol. in-8° avec 41 gravures dans le texte. 3^e édit. 6 fr.

Ce livre n'a pas la prétention de donner une description complète des phénomènes sonores, ni d'exposer toute l'histoire des lois musicales; l'auteur a cherché seulement à réunir deux sujets qui jusqu'alors avaient été traités séparément. En effet, le physicien ne se hasarde guère sur le terrain de la musique, et les artistes ne connaissent pas assez l'importance considérable des lois du son, dans un grand nombre de questions. Exposer brièvement les principes fondamentaux de l'acoustique et en montrer les plus importantes applications, tel est le but de cet ouvrage. Il se trouve présenter ainsi un grand intérêt pour ceux qui aiment à la fois l'art et la science.

Principes scientifiques des beaux-arts, par E. BRÜCKE, professeur à l'Université de Vienne, suivi de *L'Optique et les Arts*, par H. HELMHOLTZ, professeur à l'Université de Berlin. 1 vol. in-8° avec gravures, 4^e édit. 6 fr.

Dans ce volume sont réunies les recherches principales de deux savants, MM. Brücke et Helmholtz, et les matériaux qui y sont contenus montrent, par leur diversité et leur importance, que la peinture et la sculpture ne perdent rien à devenir savantes tout en demeurant artistiques. *La perspective, la distribution de la lumière et des ombres, la couleur avec les harmonies et ses contrastes*, sont autant de sujets scientifiques que les peintres ne sauraient se dispenser d'étudier. Les auteurs donnent également d'intelligents conseils sur le mode d'éclaircissement des modèles qui est déterminé par des lois rigoureuses et dont on ne s'écarte qu'au détriment de la vérité des effets; ils traitent également la question connexe de l'éclaircissement des galeries de tableaux.

Théorie scientifique des couleurs et leurs applications aux arts et à l'industrie, par O.-N. ROOD, professeur de physique à Columbia-College de New-York (États-Unis). 1 vol. in-8° avec 130 figures dans le texte et une planche en couleurs, 2^e édit. 6 fr.

M. Rood est un éminent professeur de physique des États-Unis, et en même temps un peintre distingué. Son livre convient à la fois, grâce aux aptitudes variées de son auteur, aux artistes et aux gens du monde. On y trouve, sous une forme accessible, l'exposé des diverses théories sur les couleurs et sur leur perception dans l'œil humain, ainsi que les applications si variées et si curieuses que beaucoup de ces théories ont trouvées dans l'industrie. Enfin le rôle des couleurs dans la peinture, les moyens de les employer et l'étude des divers genres, forment une partie importante de l'ouvrage.

Les volumes suivants sont sous presse ou en préparation :

MEUNIER (STAN.). **La géologie comparée**. 1 vol. avec gravures.

ROCHE. **La culture des mers**. 1 vol. avec gravures.

DUMESNIL. **L'hygiène de la maison**. 1 vol. avec gravures.

GUIGNET. **Poteries, verres et émaux**. 1 vol. avec gravures.

KUNCKEL D'HERCULAIS. **Les sauterelles**. 1 vol. avec gravures.

CORNIL ET VIDAL. **La microbiologie**. 1 vol. avec gravures.

MORTILLET (DE). **L'origine de l'homme**. 1 vol. avec gravures.

PERRIER (E.). **L'embryologie générale**. 1 vol. avec gravures.

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS

LISTE GÉNÉRALE PAR ORDRE D'APPARITION DES 81 VOLUMES
DE LA BIBLIOTHÈQUE
SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE

1. TYNDALL. Les Glaciers et les Transformations de l'eau, *illustré*. 5^e éd.
2. BAGEHOT. Lois scientifiques du développement des nations. 5^e éd.
3. MAREY. La Machine animale, *illustré*. 5^e éd.
4. BAIN. L'Esprit et le Corps. 5^e éd.
5. PATTINGREW. La Loconotion chez les animaux, *illustré*. 2^e éd.
6. HERBERT SPENCER. Introduction à la science sociale. 11^e éd.
7. SCHMIDT. Descendance et Darwinisme, *illustré*. 8^e éd.
8. MAUDSLEY. Le Crime et la Folie. 6^e éd.
9. VAN BENEDEN. Les Commensaux et les Parasites du règne animal, *illustré*. 3^e éd.
10. BALFOUR STEWART. La Conservation de l'énergie, *illustré*. 5^e éd.
11. DRAPER. Les Conflits de la science et de la religion. 9^e éd.
12. LÉON DUMONT. Théorie scientifique de la sensibilité. 4^e éd.
13. SCHUTZENBERGER. Les Fermentations, *illustré*. 5^e éd.
14. WHITNEY. La Vie du langage. 4^e éd.
15. COOKE et BERKELEY. Les Champignons, *illustré*. 4^e éd.
16. BERNSTEIN. Les Sens, *illustré*. 5^e éd.
17. BERTHELOT. La Synthèse chimique. 7^e éd.
18. VOGEL. Photographie et Chimie de la lumière, *illustré*. 4^e éd. (épuisé).
19. LUYSS. Le Cerveau et ses Fonctions, *illustré*. 7^e éd.
20. STANLEY JEVONS. La Monnaie et le Mécanisme de l'échange. 5^e éd.
21. FUCHS. Volcans et Tremblements de terre, *illustré*. 6^e éd.
22. BRIALMONT (le général). La Défense des États et les Camps retranchés, *illustré*. 4^e éd. (sous pr.).
23. DE QUATREFAGES. L'Espèce humaine. 11^e éd.
24. P. BLASERNA et HELMHOLTZ. Le Son et la Musique, *illustré*. 4^e éd.
25. ROSENTHAL. Les Nerfs et les Muscles, *illustré*. 2^e éd. (épuisé).
26. BRUCKE et HELMHOLTZ. Principes scientifiques des Beaux-Arts, *illustré*. 4^e éd.
27. WURTZ. La Théorie atomique. 6^e éd.
- 28-29. SECHET (le Père). Les Etoiles, 2 vol., *illustrés*. 2^e éd.
30. JOLY. L'Homme avant les métaux, *illustré*. 4^e éd.
31. A. BAIN. La Science de l'éducation. 7^e éd.
- 32-33. THURSTON. Histoire de la machine à vapeur, 2 vol. *illustrés*. 2^e éd.
34. HARTMANN. Les Peuples de l'Afrique, *illustré*. 2^e éd.
35. HERBERT SPENCER. Les Bases de la morale évolutionniste. 5^e éd.
36. HUXLEY. L'Écriteuse (Introduction à la zoologie), *illustré*.
37. DE ROBERTY. La Sociologie. 3^e éd.
38. MOOD. Théorie scientifique des couleurs, *illustré*. 2^e éd.
39. DE SAPORTA et MARION. L'Évolution du règne végétal (les Phanérogames), 2 vol. *illustrés*.
- 40-41. CHARLITON BASTIAN. Le Cerveau et la Pensée chez l'homme et les animaux, 2 vol. *illustrés*. 2^e éd.
42. JAMES SULLY. Les Illusions des sens et de l'esprit, *illustré*. 2^e éd.
43. YOUNG. Le Soleil, *illustré*.
44. DE CANDOLLE. Origine des plantes cultivées. 3^e éd.
- 45-46. LEBBOCK. Fourmis, Abeilles et Guêpes, 2 vol. *illustrés*.
47. PERRIER. La Philosophie zoologique avant Darwin. 2^e éd.
48. STALLO. La Matière et la Physique moderne. 2^e éd.
49. MANTEGAZZA. La Physionomie et l'Expression des sentiments, *illustré*. 2^e éd.
50. DE MEYER. Les Organes de la parole et leur emploi pour la formation des sons du langage, *illustré*.
51. DE LANESSAN. Le Sapin (Introduction à la botanique), 2^e éd., *illustré*.
- 52-53. DE SAPORTA et MARION. L'Évolution du règne végétal (les Cryptogames), *illustré*.
54. TROCESSART. Les Microbes, les Ferments et les Moisissures, *illustré*. 2^e éd.
55. HARTMANN. Les Singes anthropoïdes et leur organisation comparée à celle de l'homme, *illustré*.
56. SCHMIDT. Les Mammifères dans leurs rapports avec leurs ancêtres géologiques, *illustré*.
57. BINET et FÉRÉ. Le Magnétisme animal, *illustré*. 4^e éd.
- 58-59. ROMANES. L'Intelligence des animaux, 2 vol. *illustrés*. 2^e éd.
60. DRYFUS. L'Évolution des mondes et des sociétés. 3^e éd.
61. LAGRANGE. Physiologie des exercices du corps. 6^e éd.
62. DAUBRÉE. Les Régions invisibles du globe et des espaces célestes, *illustré*. 2^e éd.
- 63-64. LEBBOCK. L'Homme préhistorique, 2 vol. *illustrés*. 3^e éd.
65. RICHET. La Chaleur animale, *illustré*.
66. FALSAN. La Période glaciaire, *illustré*.
67. BEACNIS. Les Sensations internes.
68. CARTAILHAC. La France préhistorique, *ill.* 2^e éd.
69. BERTHELOT. La Révolution chimique.
70. LEBBOCK. Sens et instincts des animaux, *illustré*.
71. STARCKE. La famille primitive.
72. ARDING. Les virus, *illustré*.
73. TOPINARD. L'Homme dans la nature, *illustré*.
74. BINET (Alf.). Les Altérations de la personnalité.
75. DE QUATREFAGES. Darwin et ses précurseurs français, 2^e éd.
76. ANDRÉ LAFÈVRE. Les races et les langues.
- 77-78. DE QUATREFAGES. Les Emules de Darwin.
79. BRUNACHE. Le Centre de l'Afrique, *illustré*.
80. ANGOIT. Les Aurores polaires, *illustré*.
81. JACCARD. Le Pétrole, l'Asphalte et le Bitume, *ill.*

Prix de chaque volume, cartonné à l'anglaise. 6 fr.

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE OU VALEUR SUR PARIS.

Coulommiers. — Imp. PAUL BRODARD. — 135-35.

