

Werk

Label: Introduction

Jahr: 1886

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?129323659_0046|log31

Kontakt/Contact

[Digizeitschriften e.V.](#)
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

✉ info@digizeitschriften.de

INTRODUCTION.

J'indique dès l'abord nettement le but principal du nouveau Travail que j'ai l'honneur de présenter à l'ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES DE BELGIQUE. — Par suite de la forme que j'ai dû lui donner, le lecteur pourrait être aisément amené à confondre l'objet essentiel avec un objet secondaire, quoique fort important. — Je me propose non seulement de réfuter des objections critiques qui m'ont été faites, mais encore et surtout d'exposer d'une manière plus précise que je ne l'avais fait, les arguments que j'ai opposés à la Théorie cinétique qui a envahi à peu près généralement la Physique moderne.

A la fin de leurs Rapports si bienveillants ¹, relatifs à mon Mémoire sur l'écoulement et sur le choc des gaz ², les trois Commissaires, MM. FOLIE, VAN DER MENSBRUGGHE et mon regretté ami MELSSENS, émettent le vœu que M. CLAUSIUS veuille bien discuter avec moi les conclusions qu'à deux reprises

¹ BULLETIN DE L'ACADÉMIE ROYALE DE BELGIQUE, 3^{me} série, tome IX, n° 2, 1885.

² RECHERCHES EXPÉRIMENTALES ET ANALYTIQUES SUR LES LOIS DE L'ÉCOULEMENT ET DU CHOC DES GAZ EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE; CONSÉQUENCES PHYSIQUES ET PHILOSOPHIQUES QUI DÉCOULENT DE CES EXPÉRIENCES (suivies des RÉFLEXIONS GÉNÉRALES AU SUJET DES RAPPORTS DE MM. LES COMMISSAIRES-EXAMINATEURS DE CE MÉMOIRE); présentées à la Classe des Sciences de l'Académie royale de Belgique, dans sa séance du 11 octobre 1884, et publiées dans ses Mémoires, t. XLVI, 1886. — Ce travail se trouve, tiré à part, chez M. GAUTHIER-VILLARS, à Paris.

différentes j'ai tirées de mes expériences sur la résistance ¹ et sur le choc des gaz.

Cet appel a été entendu, et M. CLAUSIUS a présenté une Note, insérée au *Bulletin de l'Académie* ², dans laquelle il entreprend effectivement de réfuter trois des objections que j'ai faites à la Théorie cinétique des gaz.

Dans la réponse que j'ai eu l'honneur de faire à M. FOLIE et qui a paru dans mon Mémoire même, ainsi que sous forme de tirage à part sous le titre : « AVENIR DU DYNAMISME ³ », j'ai exprimé un regret, au sujet de cet appel fait à M. CLAUSIUS par mes juges. Personne n'a pu se méprendre sur les motifs de ce regret. Je craignais de devenir peut-être le défenseur inhabile ou trop faible de l'une des plus belles causes qu'il ait été donné à un savant de soutenir. — Je craignais aussi que par la force des choses la discussion ne prit un caractère personnel. Je ne m'étais attaqué jusqu'ici qu'à une Doctrine que je regarde comme erronée. La défense d'une partie de cette Doctrine par M. CLAUSIUS pourra bien, pensais-je, changer le caractère de la discussion. C'est désormais moi qui serai attaqué et qui, par conséquent, serai obligé de me défendre.

Mes craintes ont été parfaitement justifiées à ce second point de vue, sans que j'aie toutefois lieu de le regretter. Je ferai mon possible pour

¹ RECHERCHES EXPÉRIMENTALES ET ANALYTIQUES SUR LA RELATION QUI EXISTE ENTRE LA RÉSISTANCE DES GAZ AU MOUVEMENT DES CORPS ET LEUR TEMPÉRATURE ; CONSÉQUENCES PHYSIQUES ET PHILOSOPHIQUES QUI DÉCOULENT DE CES EXPÉRIENCES ; présentées à la Classe des Sciences de l'Académie royale de Belgique, dans sa séance du 2 juillet 1881, et publiées dans ses Mémoires, t. XLIII, 1882. — Ce travail est déposé, en tirage à part, chez M. BARTH, à Colmar, et chez M. GAUTHIER-VILLARS, à Paris.

² EXAMEN DES OBJECTIONS FAITES PAR M. HIRN A LA THÉORIE CINÉTIQUE DES GAZ, par R. CLAUSIUS ; *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, 3^{me} série, tome XI, n° 3, 1886.

³ L'AVENIR DU DYNAMISME DANS LES SCIENCES PHYSIQUES ; RÉFLEXIONS GÉNÉRALES AU SUJET D'UN RAPPORT LU A L'ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES DE BELGIQUE, par M. FOLIE, *premier commissaire* ; grand in-4°, 1886, chez M. GAUTHIER-VILLARS, à Paris.

qu'elles ne le soient pas au premier point de vue : pour ne pas rester trop au-dessous de la tâche qui m'est imposée.

Ce n'est pas une polémique que j'ai en vue. Je répondrai à M. CLAUSIUS, avec tous les soins nécessaires, sur les questions où je suis personnellement mis en cause; mais je laisserai de suite la discussion remonter à la hauteur où elle se place d'elle-même par la nature des choses discutées. J'ai eu la satisfaction, en ce qui concerne le fait isolé de la Théorie cinétique des gaz, d'arriver à quelques arguments nouveaux, et aussi de donner plus de solidité à ceux que j'avais déjà fait connaître dans plusieurs de mes travaux antérieurs. Je serai obligé sans doute de me répéter, de revenir sur ce que j'ai déjà dit à plusieurs reprises ailleurs. J'espère que personne ne m'en fera de reproche. J'ai fait tous mes efforts pour ramener sur le domaine de la Physique-Mécanique élémentaire la discussion de problèmes que généralement on ne croit abordables que par les Mathématiques supérieures, et pour montrer qu'ils ne peuvent, au contraire, être attaqués avec sécurité que quand on les revêt d'une forme que l'esprit saisit aisément à première vue. Il m'a paru éminemment utile de présenter enfin sous leur vrai jour, simple, accessible, presque familier, des questions que d'aucuns relèguent dans les régions de la Métaphysique, autrement dit, de ce qu'il est reçu d'appeler la fantaisie et l'arbitraire.

Qu'il me soit permis d'adresser un pieux et dernier hommage à un Confrère aimé, que nous pleurons tous. Peu avant son départ, MELSSENS m'avait demandé ce travail presque impérativement. Il s'intéressait vivement à la grande lutte des deux Doctrines antagonistes en regard de nos jours. Esprit prime-sautier, saisissant avec une rapidité merveilleuse ces rapports cachés des choses qui échappent au vulgaire, il avait parfaitement compris la nature et les conséquences des principes en rivalité. La MATIÈRE et le MOUVEMENT, rien de plus, rien de moins, dans tout l'Univers; la Doctrine d'ÉPICURE ravivée et renforcée de toutes les découvertes de la Science moderne; la

négalion, le nihilisme, comme conséquence, d'un côté. La MATIÈRE, la FORCE, l'ÉLÉMENT ANIMIQUE et VIVANT; l'affirmation énergique d'un but et d'une destinée supérieure, comme conséquence, de l'autre côté. Voilà ce que MELSENS avait très bien saisi, dans le problème débattu. Là où d'autres ne voient que des systèmes arbitraires qu'on bâtit et qu'on défait à plaisir, là où d'autres plus sceptiques ne voient qu'un mirage fantastique, qui fuit à mesure que nous le poursuivons, il avait reconnu une question qui touche à l'avenir des Sociétés mêmes, et qu'il est presque du devoir de tout homme de Science intelligent d'attaquer dans la mesure de ses forces. Il suivait avec curiosité, presque avec anxiété, le conflit. Plus d'une fois je lui ai reproché de ne pas y prendre part lui-même. L'avouerais-je? dans les efforts auxquels il eût été astreint, j'entrevois un dérivatif à la douleur profonde qui le minait; mais l'affectivité, qui formait le fond de cette bonne âme, avait presque effacé toutes les autres facultés, et le chagrin insurmontable a enfin brisé les liens terrestres.

Ce travail, que modestement je ne présente que comme un *jalon*, mais solide, je l'espère, dans la poursuite du grand Problème, ce travail, je l'ai dit, m'avait été indiqué par MELSENS, et je comptais le lui dédier. Je me suis mis courageusement à l'œuvre et quoique récemment frappé, coup sur coup, moi-même dans mes affections, j'ai rapidement atteint le terme. Mais, hélas! je ne devais plus avoir la satisfaction de voir l'œuvre jugée par celui qui l'avait inspirée! Qu'elle reste du moins consacrée au souvenir de l'ami fidèle et éprouvé, du juste toujours ferme et intègre en ses voies, de la grande intelligence que la Science a perdue!



LA CINÉTIQUE MODERNE

ET

LE DYNAMISME DE L'AVENIR.



§ I.

Doctrines en antagonisme dans la Science moderne.

Deux grandes Doctrines, reposant sur deux principes de Physique-Mécanique antagonistes, sont aujourd'hui face à face et en lutte. La fin de ce siècle semble destinée à voir aussi finir l'une; mais ceci pourrait bien être une illusion. Le penseur convaincu d'une vérité admet toujours volontiers que le triomphe de cette vérité est proche; et presque toujours aussi il se trompe.

Les deux Principes en antagonisme sont des plus nets.

I. — Le mouvement de la Matière ne peut naître que du mouvement et par contact immédiat.

II. — Le mouvement de la Matière ne naît jamais par transmission directe de Matière à Matière.

La Doctrine qui pose le premier principe n'admet qu'un seul Élément dans l'Univers : La MATIÈRE, L'ATOME MATÉRIEL se mouvant dans le vide parfait. Pour les adeptes *radicaux* de cette Doctrine, la Matière a existé de toute éternité; la somme de ses mouvements est une constante, éternelle aussi. C'est avec l'atome matériel en mouvement que l'on construit tout le mécanisme des cieux, que l'on construit une combinaison chimique, un cristal, un cerveau humain, et la pensée sous toutes ses formes. Les adeptes *modérés*

de la Doctrine admettent que la Matière a été créée, avec toute la somme de ses mouvements aussi. Arrivé aux limites du monde organique, on lui adjoint, pour le retirer à l'occasion, un Élément particulier : la Force vitale ; et sans s'apercevoir de l'étrange contradiction où l'on est déjà tombé, on lui adjoint une Ame raisonnable, quand on arrive aux limites du monde humain. Il est avec le ciel des accommodements.

La Doctrine qui part du second principe admet dans le MONDE PHYSIQUE deux classes d'Éléments distincts en nature : la MATIÈRE et la FORCE. Dans le MONDE VIVANT, elle admet une classe d'Éléments de plus, sous le titre général d'ÉLÉMENT ANIMIQUE. La Matière, constituée par des individus doués de qualités identiques qui permettent de les ranger sous un même titre commun, mais doués aussi de qualités différentes, qui les séparent entre eux. — La Force, établissant entre les parties disjointes de la Matière des rapports variés, ayant pour caractère essentiel de pouvoir produire ou détruire le mouvement de la Matière autrement que par *impulsion*, et se manifestant sous des aspects assez différents entre eux pour qu'on puisse, tout au moins provisoirement, la considérer comme formée d'individus distincts. Sous le titre commun de Forces, se rangent aujourd'hui naturellement les impondérables de l'ancienne Physique. La Force n'est point, comme on le dit parfois sous forme critique, un Élément *immatériel* ; c'est simplement un Élément absolument autre que la Matière.

La première Doctrine, plus de trente fois séculaire, s'est posée de nos temps sous le titre de *Doctrine de l'unité de Matière* ; plus récemment, elle s'est appelée la *Cinétique universelle*, la *Théorie vibratoire de l'Univers*. Acceptée avec plus ou moins de restrictions, par beaucoup de grands esprits de notre Époque, en dépit des hypothèses accessoires presque fantastiques qu'on est obligé de greffer sur elle pour l'appliquer, elle est considérée comme exclusivement sérieuse et logique par la grande majorité du public ne s'occupant de Science que superficiellement.

La seconde Doctrine, qui, dans les limites du Monde physique, peut s'appeler le DYNAMISME, ne compte qu'un petit nombre d'adhérents. Il faut un certain courage, une certaine abnégation, pour la professer ouvertement. (Les compétiteurs ne feront pas défaut, une fois que la balance aura penché

de ce côté, et il ne manquera pas non plus d'érudits pour démontrer que le Dynamisme remonte à PLATON ou même à la GENÈSE.) — Par suite des définitions fautives et des notions vicieuses qui se sont introduites dans l'enseignement, quant à la Force en général, la plupart des critiques en sont arrivés aujourd'hui à confondre complètement les faits les plus patents avec leur interprétation, et à leur adjuger le titre d'hypothèses, alors que c'est l'interprétation seule qui peut recevoir cette dénomination. Par les mêmes raisons, les rares adhérents du Dynamisme sont réputés des esprits mystiques, des chasseurs de chimères, d'inanités, de songes creux. Si je m'en rapporte à mes observations personnelles, depuis plus de vingt-cinq ans que je défends cette Doctrine, ces dénominations, tantôt avivées par quelques injures, tantôt tournées en railleries, tantôt adoucies sur leurs contours, selon le degré de malveillance ou de bienveillance des critiques, ces dénominations, dis-je, ont été les seuls arguments plausibles qu'on ait su opposer au Dynamisme.

§ II.

**Faits définitivement acquis, quant à la nature de la Chaleur,
de l'Électricité, etc.**

La question cependant a fait incontestablement un chemin considérable depuis un certain nombre d'années : il nous sera facile de le mesurer exactement.

Bien des savants reconnaissent enfin qu'au point de vue de la Mécanique la plus élémentaire, le principe qui sert de base à la *Doctrine de l'Unité de Matière* n'est pas soutenable. Alors même qu'un corps en mouvement, en frappant un autre en repos et de masse égale (par exemple), semble lui *communiquer* une partie ou la totalité de son mouvement (corps mous et corps élastiques), le mouvement du second corps résulte, non d'une transmission directe, mais de l'effort qui naît de la déformation définitive ou temporaire des deux corps par le choc, et cet effort ne peut relever d'aucun mouvement interne.

On ne s'aventure plus guère à rapporter les phénomènes de la gravitation à des mouvements d'une matière invisible. Entre deux particules de matière qui tendent l'une vers l'autre à une distance insensible, entre deux sphères du firmament qui tendent l'une vers l'autre à des millions de lieues de distance, il se trouve certainement *quelque chose* qui établit le rapport que nous appelons *attraction*, et qui remplit tout l'Espace. Ceci n'est point une hypothèse, c'est l'énoncé d'un fait pur et simple. Il est facile de démontrer que *ce quelque chose* n'est pas, comme on a essayé de le soutenir tant de fois, de la Matière invisible en mouvement ou en repos. Ce milieu est autre chose; en l'appelant FORCE, nous ne nous livrons à aucune spéculation creuse, nous ne faisons que poser un fait. L'inanité commencerait si nous essayions d'expliquer *comment* la Matière et la Substance interposée agissent l'une sur l'autre. — Un physicien sera peut-être un jour ou l'autre assez heureux pour mettre hors de doute l'existence effective de ce milieu et pour lui trouver plus que des *qualités négatives*.

Ce que nous disons ici de l'attraction newtonienne s'applique identiquement aux attractions et aux répulsions électriques, magnétiques. Il n'est pas plus possible de *matérialiser* les unes que les autres. Il n'y a rien de chimérique absolument à les rapporter à un Élément que nous appellerons Force, à défaut d'autre dénomination plus précise.

Constatons un pas de plus. Dans un Discours de réception comme Recteur de l'Université de Bonn, M. CLAUSIUS lui-même établit que l'ancien Éther de la Physique ne suffit plus pour expliquer l'ensemble des phénomènes de l'Univers. Il établit que c'est désormais l'électricité que nous devons substituer à cet Éther, *dans* les corps, comme *en dehors* des corps et dans l'Espace stellaire. Il montre implicitement qu'il est impossible d'assimiler l'électricité à la Matière; sans accorder le nom de Force à la Substance qui donne lieu aux phénomènes électriques, il en fait tout au moins le *véhicule* d'une Force.

L'Espace est de plus rempli d'un milieu capable de donner lieu aux phénomènes de lumière et de chaleur rayonnante, probablement identiques entre eux d'ailleurs. — Si les travaux expérimentaux et théoriques de MM. WEBER et KOHLRAUSCH se confirment, il existe une connexion remarquable entre les manifestations de l'électricité et celles de la lumière.

Voilà donc tout un ensemble de phénomènes qui bien certainement ne peuvent pas être rapportés à des mouvements vibratoires, ou autres, de la Matière pondérable. Il ne suit pas de là que la Substance à laquelle il faut attribuer ces phénomènes puisse recevoir le nom vague et illusoire de Principe *immatériel*; cette Substance est simplement autre chose que la Matière; et si, comme classification générale, nous l'appelons FORCE, PRINCIPE DE RELATION, ÉLÉMENT INTERMÉDIAIRE, nous ne *commettrons* rien de chimérique, rien qui mérite même le titre d'hypothèse. Nous aurons pour but, à l'avenir, de chercher patiemment si c'est une Substance unique qui donne lieu à la diversité des phénomènes, ou si nous devons chercher l'origine de cette diversité dans la diversité des Éléments naturels. C'est dans ce dernier sens que semblent pencher les faits acquis jusqu'à présent. — Je rappellerai à ce sujet les vains efforts qu'ont faits les partisans de l'unité de Matière pour prouver qu'il n'existe qu'un seul Éléments chimique : l'hydrogène primordial! C'est ici qu'il serait permis de voir, non des chimères, mais ce qui est bien pire, des idées systématiques, préconçues, ne reposant sur aucune assise solide.

La lumière et la chaleur rayonnante ne peuvent, disons-nous, à aucun titre être rapportées aux mouvements de l'atome matériel. Devons-nous maintenant faire un pas immense en arrière et admettre que ce qui nous apparaît comme *chaleur sensible* dans les corps solides, liquides ou gazeux ne soit au contraire que le résultat de vibrations atomiques? Devons-nous admettre que quand la chaleur rayonnante se trouve *absorbée*, comme on dit, par un corps, ce n'est nullement par une action dynamique directe qu'elle *dilate* (par exemple) les corps et que ce n'est qu'en excitant des vibrations qu'elle produit tous les phénomènes internes si bien étudiés aujourd'hui? Alors que nous voyons l'électricité, statique ou dynamique, se manifester bien positivement comme puissance capable de tirer la Matière du repos ou de l'y faire rentrer, se manifester comme une Force proprement dite, devons-nous admettre que sa congénère, la chaleur, soit dénuée absolument de cette puissance? — Il faut avouer que si nous ne partions que d'une simple probabilité, nous serions déjà en droit de répondre bien négativement à ces questions. Mais en matière de Science, une simple pro-

babilité ne suffit pas pour fonder une Doctrine. Nous devons ici encore faire parler, et bien haut, tous les faits dont nous disposons, pour arriver à une réponse sans réplique. — Ces faits ne nous font pas défaut.

§ III.

Objections multiples à la Théorie cinétique des gaz. — Discussion et réfutation des critiques de M. Clausius.

Nous voici arrivés au cœur même de la question en litige.

Ce qu'on a toujours appelé en Physique la *chaleur sensible*, peut-elle et surtout *doit-elle* être attribuée à des vibrations des atomes matériels?

En ce qui concerne l'étude des corps solides et liquides, on peut avec de la bonne volonté et de l'obstination de part et d'autre, trouver à peu près autant de raisons pour que contre une réponse affirmative à cette question. J'en excepte pourtant quelques objections tirées de la Chimie, auxquelles jamais la Cinétique ne satisfera qu'à l'aide de l'arbitraire le plus complet.

Il n'en est pas ainsi de l'étude des gaz et des vapeurs. Par leur propriété la plus fondamentale, ces corps rentrent de plain-pied dans le domaine de la Physique-Mécanique, et les théories qu'on imagine quant à leur constitution intime peuvent être éprouvées à l'aide des principes les plus élémentaires de la Mécanique.

La question ci-dessus peut se poser autrement, et de telle sorte que nous n'ayons plus, du moins provisoirement, à parler de Force, d'Élément dynamique : c'est un épouvantail dont, provisoirement aussi, je délivre avec plaisir mes lecteurs.

Les gaz doivent-ils être considérés comme constitués par des particules sans cesse solidaires les unes des autres, comme des *Touts*, continus et élastiques jusque dans leurs parties infinitésimales?

Ou doit-on admettre qu'ils sont formés par des particules *indépendantes* les unes des autres, dès qu'elles sont séparées par un intervalle fini, si petit qu'on veuille d'ailleurs, et comme tirant leurs propriétés les plus essentielles des mouvements de ces particules?

Dans la première interprétation, l'élasticité des gaz, c'est-à-dire leur qualité fondamentale, relève de l'essence même des choses, et devient une réalité. Dans la seconde théorie, l'élasticité n'est qu'un simulacre. — Où se trouve la vérité?

Je viens de présenter le Dynamisme et la Cinétique sous la face la plus limitée possible.

J'appellerai désormais Théorie dynamique des gaz la première interprétation et Théorie cinétique la seconde.

Dans mes derniers travaux, et notamment dans les deux Mémoires que j'ai eu l'honneur de présenter à l'ACADÉMIE ROYALE DE BELGIQUE, j'ai posé huit objections capitales à la Théorie cinétique des gaz. Si une seule d'entre elles est fondée, la Théorie s'écroule sur sa base. Dans sa critique, publiée au *Bulletin de l'Académie royale de Belgique* ¹, M. CLAUSIUS s'attaque à trois de ces objections et laisse les autres dans l'ombre. Il va m'être facile de montrer que bien loin de réfuter ces trois objections, mon illustre critique leur a donné une force nouvelle et une sanction définitive. Toutes les huit restent donc debout. J'y ajouterai une neuvième, et je vais les développer successivement avec autant de netteté que possible. Mais je dois répondre d'abord à une critique générale que fait M. CLAUSIUS quant au point de départ de mon argumentation.

Je cite textuellement :

.

 « Remarquons d'abord que M. HIRN fait un usage trop étendu de certaines hypothèses simplificatives, qui, dans des circonstances spéciales, peuvent être employées pour faciliter la compréhension. Suivant la Théorie cinétique des gaz, les molécules d'une masse de gaz apparemment en repos sont douées de mouvements rapides et diversement alternants. Elles se meuvent dans toutes les directions possibles, mais la distance qu'elles parcourent entre deux chocs consécutifs est très courte. Lorsque le gaz a la densité qui correspond à la pression d'une atmosphère et

¹ 3^{me} série, t. XI, n° 3, 1886.

à la température de la glace fondante, les courses ont une longueur moyenne qui est, pour tous les gaz, l'hydrogène excepté, moindre qu'un dix-millième de millimètre. De plus, les chocs entre deux molécules sont en général obliques et excentriques, de sorte qu'après chaque choc les directions et les vitesses des deux molécules sont totalement changées.

» Ce sont ces mouvements compliqués que M. HIRN remplace par d'autres, beaucoup plus simples, en admettant que les molécules se meuvent seulement suivant trois directions rectangulaires entre elles; qu'elles ne se troublent pas mutuellement dans leurs mouvements, mais qu'au contraire chacune continue à se mouvoir en ligne droite jusqu'à la rencontre d'une paroi solide. De semblables hypothèses ne peuvent être appliquées qu'avec réserve; car, si, dans certains cas, elles fournissent des résultats exacts, il n'en est pas moins vrai qu'en d'autres circonstances elles induisent en erreur. On verra dans la suite qu'elles sont en partie inadmissibles dans le cas considéré par M. HIRN. »

.

Les reproches que me fait M. CLAUSIUS sont presque identiquement les mêmes que ceux que m'avait adressés M. FOLIE dans son rapport. Je pensais que les observations que j'ai présentées à ce sujet dans ma réponse à M. FOLIE me mettraient à l'abri de ce genre de critique. J'y reviens puisque cela est nécessaire.

Certes, si la Théorie cinétique était une vérité, les phénomènes internes d'un gaz seraient plus compliqués, *effroyablement* plus compliqués que ceux que j'ai admis. Il est facile de démontrer élémentairement que dans un gaz chimiquement simple, c'est-à-dire formé d'atomes isolés, supposés sphériques et parfaitement élastiques, le *hasard* des chocs en toutes directions pourra amener temporairement le *repos*, c'est-à-dire le *zéro absolu*, pour certains atomes, tandis que d'autres recevront des vitesses mille fois supérieures à la vitesse normale répondant, d'après la Cinétique, à la température moyenne. Si d'un gaz à atomes simples nous passons à un gaz composé, dont les molécules ne peuvent plus à aucun titre être considérées comme

sphériques, les choses se compliquent encore plus. Aux mouvements de translation les plus variés s'ajouteront des mouvements de rotation, pouvant être, à l'occasion, prodigieusement rapides. En présence d'un pareil état de choses, on aura beau recourir aux grands nombres, admettre des milliards de milliards de molécules dans l'unité de volume, on n'expliquera plus jamais l'égalité de pression continuellement exercée par un gaz en tous sens. Au point de vue de l'observation et de l'expérience, qu'on oublie par trop souvent en pareille matière, il n'existe pas une portion finie de la surface d'un réservoir plein de gaz où la pression ne s'exerce absolument de la même manière; pour expliquer ce fait, on est donc condamné à admettre que dans chaque partie en quelque sorte infinitésimale du volume du gaz, la vitesse moléculaire en tous sens est, en dépit de la confusion des chocs, absolument la même que dans le volume entier.

C'est ce que CLERK MAXWELL avait parfaitement compris et c'est ce qui l'a amené à doter les molécules d'une puissance répulsive diminuant très rapidement avec l'accroissement des distances.

Je n'ai pas songé un instant à dire que les molécules, dans une veine gazeuse ou dans un conduit, se meuvent suivant trois directions rectangulaires entre elles, et que ce soit là la réalité. J'ai seulement dit qu'on peut *décomposer* leurs mouvements de cette façon, comme en Mécanique, on rapporte une même force à trois axes rectangulaires. Si l'on admet qu'en Cinétique, la confusion des mouvements moléculaires est telle que cette méthode ne puisse plus être suivie, je ne crains pas de dire que cette Doctrine se porte elle-même la plus rude atteinte et se rend insoutenable aux yeux de quiconque voit ici une question de Physique et non un problème d'Algèbre.

Si je n'ai pas parlé de phénomènes pareils, ce n'est assurément pas, comme on dirait familièrement, pour me faire *la partie plus facile*; c'est bien au contraire pour ne pas présenter la Cinétique sous un aspect réellement inacceptable, pour ne pas convertir cette Théorie des gaz en une branche nouvelle et spéciale du Calcul des probabilités. J'ai cru ne pouvoir mieux faire en ce sens que de me conformer aux conditions posées à l'existence même de la Cinétique par le savant qui a su lui donner la forme la plus rationnelle.

Je traduis textuellement M. CLAUSIUS ¹.

Pages 233 et suiv. — « Lorsque deux molécules, dont les parties constituantes sont en mouvement, viennent à se heurter, elles ne rebondissent pas suivant les lois habituelles de l'élasticité, comme le feraient deux sphères élastiques : les vitesses et les directions

¹ ABHANDLUNGEN ÜBER DIE ZUR ERKLÄRUNG DER WÄRME ANGENOMMEN MOLECULARBEWEGUNGEN ; Zweite Abtheilung der ABHANDLUNGEN ÜBER DIE MECHANISCHE WÄRMETHEORIE VON R. CLAUSIUS, 1867. — Abhdlg. XIV ; *Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen.*

.....

Pages 233 et suiv. — Wenn zwei Molecüle, deren Bestandtheile in Bewegung sind, gegen einander stossen, so werden sie nicht nach den gewöhnlichen Elasticitätsgesetzen, wie zwei elastische Kugeln, von einander abprallen, sondern die Geschwindigkeiten und Richtungen, in welchen sie auseinander fliegen, werden ausser von der Bewegung, welche die ganzen Molecüle vor dem Stosse hatten, noch von der augenblicklich stattfindenden Bewegung derjenigen Bestandtheile, welche sich beim Stosse am nächsten kommen, abhängen. Wenn aber die verschiedenen Bewegungen sich einmal so ausgeglichen haben, dass die fortschreitende Bewegung durch die Bewegungen der Bestandtheile durchschnittlich nicht vermehrt oder vermindert wird, so kann man bei der Untersuchung der Gesamtwirkung einer grossen Anzahl von Molecülen die bei den einzelnen Stössen vorkommenden Unregelmässigkeiten vernachlässigen, und annehmen, dass die Molecüle in Bezug auf die fortschreitende Bewegung den gewöhnlichen Elasticitätsgesetzen folgen.

Die Erklärung der Expansivkraft des Gases und ihrer Abhängigkeit von Volumen und Temperatur, wie sie KRÖNIC gegeben hat, erleidet durch das Hinzukommen der anderen Bewegungen keine wesentliche Aenderung. Der Druck des Gases gegen eine feste Wand hat seinen Grund darin, dass die Molecüle fortwährend in grosser Zahl gegen die Wand fliegen und von ihr abprallen. Die Kraft, welche dadurch entstehen muss, ist erstens bei gleicher Bewegungsgeschwindigkeit dem Volumen der gegebenen Gasmenge umgekehrt proportional, und zweitens bei gleichem Volumen der lebendigen Kraft der fortschreitenden Bewegung proportional, ohne dass die anderen Bewegungen dabei unmittelbar in Betracht kommen.

.....

Pages 235 et suiv. — Damit das Mariotte'sche und Gay-Lussac'sche Gesetz und die mit ihm in Verbindung stehenden Gesetze streng gültig seien, muss das Gas in Bezug auf seinen Molecularzustand folgenden Bedingungen genügen.

1) Der Raum, welchen die Molecüle des Gases wirklich ausfüllen, muss gegen den ganzen Raum, welchen das Gas einnimmt, verschwindend klein sein.

2) Die Zeit eines Stosses, d. h. die Zeit, welche ein Molecül, indem es gegen ein anderes

qu'elles ont en se quittant dépendent non seulement du mouvement qu'elles avaient dans leur totalité, mais encore du mouvement actuel de celles de leurs parties constituantes qui se trouvent en contact immédiat pendant le choc. Mais une fois que les divers mouvements se sont égalisés de telle sorte que les mouvements de translation ne soient plus altérés par les mouvements propres des parties constituantes, on peut, dans l'étude de l'influence réciproque d'un grand nombre de molécules, négliger les irrégularités qui résultent de chocs isolés et admettre que, quant au mouvement de translation, les molécules obéissent aux lois ordinaires de l'élasticité.

» L'interprétation de la Force expansive et de sa dépendance avec le volume et la température, telle que KRÖNIG l'a donnée, ne souffre pas de modifications essentielles, par suite des autres mouvements qui interviennent. La pression d'un gaz contre les parois solides repose sur ce fait que les molécules frappent toujours en très grand nombre l'obstacle résistant. La Force qui résulte de là est en premier lieu, pour une même vitesse de translation, inversement proportionnelle à la quantité de gaz présente et, en second lieu, à égalité de volume, elle est proportionnelle à la force vive

Molecül oder eine feste Wand stösst, bedarf, um seine Bewegung in der Weise zu ändern, wie es durch den Stoss geschieht, muss gegen die Zeit, welche zwischen zwei Stössen vergeht, verschwindend klein sein.

3) Der Einfluss der Molecularkräfte muss verschwindend klein sein. Hierin liegt zweierlei. Zunächst wird gefordert, dass die Kraft, mit welcher die sämtlichen Molecüle sich in ihren mittleren Entfernungen noch gegenseitig anziehen, gegen die aus der Bewegung entstehende Expansivkraft verschwindet. Nun befinden sich aber die Molecüle nicht immer in ihren mittleren Entfernungen von einander, sondern bei der Bewegung kommt oft ein Molecül in unmittelbare Nähe eines anderen oder einer ebenfalls aus wirksamen Molecülen bestehenden festen Wand, und in solchen Momenten treten natürlich die Molecularkräfte in Thätigkeit. Die zweite Forderung besteht daher darin, dass die Theile des von einem Molecüle beschriebenen Weges, auf welchen diese Kräfte von Einfluss sind, indem sie die Bewegung des Molecüls in Richtung oder Geschwindigkeit merklich ändern, gegen die Theile des Weges, auf welchen die Kräfte als unwirksam betrachtet werden können, verschwinden.

.....

représentée par le mouvement de translation, sans que l'on ait à prendre en considération immédiate les autres mouvements. »

Pages 235 et suiv. — « Pour que la loi de Mariotte et de Gay-Lussac se vérifie rigoureusement, il faut que le gaz, en ce qui concerne son état moléculaire, remplisse les conditions suivantes :

» 1° Il faut que le volume réel occupé par les molécules soit négligeable par rapport au volume total qu'occupe le gaz;

» 2° Il faut que la durée même du choc des molécules, entre elles, ou contre les parois solides, soit comme infiniment petite par rapport à l'intervalle de temps qui s'écoule *entre* les chocs;

» 3° Enfin il faut que l'action réciproque, et à distance, des molécules entre elles soit négligeable. Il y a ici deux choses à distinguer. En premier lieu il faut que la force avec laquelle les molécules s'attirent encore à leur distance moyenne soit négligeable par rapport à la force expansive qui naît de leur mouvement. Les molécules ne se trouvent toutefois pas toujours à cette distance moyenne les unes des autres, mais par suite du mouvement, au contraire, une molécule arrive en contact presque immédiat soit avec une autre, soit avec une paroi résistante et dans ces moments les forces moléculaires entrent naturellement en action. En second lieu il faut que cette partie du chemin parcouru par les molécules dans le moment où elles agissent les unes sur les autres de façon à changer notablement de direction et de vitesse soit absolument négligeable par rapport au chemin parcouru quand les forces moléculaires n'ont plus d'action notable. »

Si je fais cette citation, ce n'est certes pas pour mettre M. CLAUSIUS en contradiction avec lui-même. C'est seulement pour être de mon côté à l'abri de sa critique. En admettant avec lui que chaque atome des gaz mélangés qui forment l'air (par exemple) ne parcourt qu'un dix-millième de millimètre entre chaque choc, et en réduisant le diamètre, fort arbitrairement d'ailleurs, à un milliardième de millimètre, par exemple, le chemin parcouru par chacun entre les rencontres est encore très grand. — Toutefois, là n'est nullement la question, et c'est ce que je tiens à montrer une fois pour toutes.

Le fait fondamental, capital, le seul dont il y ait à s'occuper, dans la Cinétique des gaz, c'est que les atomes ou les molécules ou les particules (assemblage de molécules) y sont forcément considérés comme absolument *indépendants*, quand le contact immédiat cesse, et comme séparés par des intervalles moyens *extrêmement* grands par rapport à leur diamètre. Si avec MAXWELL on intercale une Force répulsive, il est inutile de recourir encore à des mouvements pour expliquer la pression exercée en tous sens par les gaz. — A ce fait fondamental on est obligé d'en superposer un autre, qui s'impose comme principe de Mécanique, à savoir :

Que quelle que soit la variété, en grandeur, des vitesses atomiques, qui dérive de la variété des chocs, la vitesse moyenne effective est une constante et que, par conséquent, on est pleinement en droit de prendre cette vitesse moyenne comme élément dans les calculs.

Cela posé, il est maintenant évident que la seule chose dont il y ait à tenir compte dans l'analyse, c'est la direction et la vitesse atomique ou moléculaire au moment même de la percussion contre une paroi ou un obstacle quelconque. Ce qui se passe avant et après cet instant, infiniment court d'après la définition même, ne peut plus intervenir à aucun titre dans l'ensemble du phénomène. Que les molécules se heurtent par milliards de toutes les façons imaginables, qu'elles aient parcouru, en ligne droite et librement, des centaines de mètres ou seulement un dix-millième de millimètre, avant que les unes ou les autres frappent les parois d'un réservoir (par exemple), rien n'est par là changé au résultat final. — Nous pouvons et nous devons admettre toutes les directions possibles; mais nous ne pouvons admettre qu'une seule vitesse moyenne pour toutes ces directions. — Hors de là, je le répète, la Théorie des gaz passe du domaine de l'Hydrostatique et de l'Hydrodynamique sur celui du Calcul des probabilités.

Je n'ai donc rien à modifier à la méthode que j'ai suivie pour faire l'analyse des phénomènes du choc, de l'écoulement, etc., etc., des gaz, car je n'ai fait que suivre la route que M. CLAUSIUS a tracée et qu'il a de plus suivie dans sa critique. — Je reviendrai au surplus sur ces détails dans les paragraphes suivants, chaque fois qu'il sera nécessaire.

§ IV.

Suite de la discussion des critiques de M. Clausius.

J'aborde le corps principal de la critique de M. CLAUSIUS.

Objections I et II

*tirées de l'étude du choc d'un corps en mouvement dans un gaz en repos
et de celui d'une veine gazeuse contre un plan fixe.*

M. CLAUSIUS commence par examiner les conclusions auxquelles m'a conduit mon second Mémoire (1886), celui où je traite de l'écoulement et du choc d'une veine de gaz, chaud ou froid, contre un plan fixe, et ce n'est qu'en second lieu qu'il attaque les conclusions de mon premier Mémoire (1882), celui où j'examine les effets du choc d'un plan en mouvement contre de l'air, chaud ou froid, en repos. Je renverserai l'ordre de mes réponses, car ce renversement me permettra d'abrégier considérablement.

Dans sa critique de mon analyse du choc d'une veine d'air contre un plan fixe, M. CLAUSIUS s'attache à démontrer que, *très à tort*, je n'ai tenu compte que des molécules allant vers le plan, et non de celles qui vont en sens contraire. Il formule encore cette critique pour le cas du choc d'un plan contre l'air.

.

* Dans la *résistance de l'air*, il s'agit d'un cas absolument analogue à celui qui a été traité précédemment. Ce dernier se rapportait à l'action de l'air en mouvement sur un corps au repos ; ici, il s'agit de l'action de l'air au repos sur un corps en mouvement. Aussi l'objection de M. HURN, et les raisonnements qui le conduisent à la faire, sont-ils les mêmes dans les deux cas. Ce savant a reconnu, par ses expériences, que la résistance de l'air dépend uniquement de sa densité, et non de sa température. Ce résultat lui paraît être en désaccord avec la Théorie cinétique des gaz, mais il n'est arrivé à cette conclusion que parce qu'il n'a considéré, dans la déduction théorique de la résistance de

l'air au moyen de la Théorie cinétique des gaz, que les mouvements moléculaires dirigés vers le corps et non pas ceux qui sont dirigés en sens inverse. L'inexactitude de ce procédé pouvant être démontrée absolument de la même manière que tout à l'heure, il ne sera pas nécessaire de revenir sur les explications qui précèdent. »

.

J'ai le regret d'être obligé de dire que l'assertion formulée ici par M. CLAU-SIUS est absolument contraire à la vérité. Tous mes lecteurs pourront s'en assurer par eux-mêmes. — Dans mon Mémoire de 1882, j'ai établi deux systèmes d'intégrales :

- 1° L'un se rapportant aux molécules qui rencontrent le plan en amont de sa course ;
- 2° L'autre concernant les molécules qui atteignent le plan en aval.

Dans la réponse que j'ai faite à M. FOLIE à la fin de mon dernier Mémoire, j'ai repris la question avec plus d'attention encore, et, tenant compte d'une remarque critique que m'avait faite mon ami DWELSHAUVERS-DERY, le professeur distingué de Mécanique de l'Université de Liège, j'ai ajouté un troisième système d'intégrales, se rapportant aux molécules qui *fuient* le plan en amont et qui sont en partie atteintes par lui.

Je les reproduis au complet.

Nous pouvons diviser en trois catégories les molécules qui rencontrent le plan (∂x) sur ses deux faces : 1° en amont, les unes marchent vers la surface ; 2° les autres, au contraire, la *fuient* ; 3° et en aval, toutes la *poursuivent* :

1° En amont, celles de la première catégorie frapperont toutes avec une vitesse relative qui a pour expression $(U \sin \theta + V)$, θ étant l'angle d'incidence ; U, la vitesse moyenne des molécules, répondant à la température absolue T ; et V la vitesse constante du plan (∂x). Ces molécules rebondiront avec une vitesse absolue ayant pour valeur :

$$u_0 = (U \sin \theta + 2V) ;$$

2° En amont aussi, parmi les molécules qui *fuient* la plaque, celles-là seules seront atteintes qui auront une direction telle qu'on ait $V > U \sin \theta$.

La percussion aura lieu avec une vitesse relative ($-U \sin \theta + V$); elles rebondiront avec une vitesse absolue :

$$u_1 = (-U \sin \theta + 2V);$$

3° Enfin les molécules de la troisième catégorie, qui, en aval, sont poursuivies par la plaque, ne seront atteintes que si l'on a : $U \sin \theta < V$. Elles rebondiront avec une vitesse :

$$u_2 = (U \sin \theta - 2V).$$

[Il est bien entendu que c'est de la vitesse dans la direction normale au plan qu'il est question et non de la vitesse dans le sens même de la réflexion. Celle-ci a pour valeur

$$u^2 = (\pm U \sin \theta + 2V)^2 + U^2 \cos^2 \theta.$$

Mais alors c'est U^2 qu'il faut retrancher de la somme et non $U^2 \sin^2 \theta$. Le résultat final, comme de raison, n'est pas altéré de la sorte. (Mai, 1886.)]

En désignant par μ la masse d'une molécule, on a donc pour la valeur de la force vive gagnée ou perdue par chacune, ou pour le travail perdu ou gagné par suite du mouvement du plan :

$$\text{Première catégorie} \quad \mu[(U \sin \theta + 2V)^2 - U^2 \sin^2 \theta];$$

$$\text{Deuxième catégorie} \quad \mu[(-U \sin \theta + 2V)^2 - U^2 \sin^2 \theta];$$

$$\text{Troisième catégorie} \quad \mu[(U \sin \theta - 2V)^2 - U^2 \sin^2 \theta].$$

Il semble à première vue que, pour avoir le travail dépensé pour le maintien de la vitesse V de la plaque, il nous suffise de faire convenablement la somme de ces trois genres de force vive. Ce serait là pourtant une grosse erreur : la pression exercée sur les deux faces de (∂x) , par suite des chocs, dépend, en effet, non seulement de l'intensité de chaque percussion, mais encore du nombre de percussions qui ont lieu dans l'unité de temps. Déterminons ce nombre.

Autour de (∂x) (que nous avons fait extrêmement petit) concevons une nappe sphérique idéale dont le rayon soit 1.

Pour des molécules arrivant ou fuyant en une même direction, le nombre cherché serait visiblement (D étant la distance de deux molécules consécutives) :

$$1^{\circ} \text{ En amont. } \dots \dots \frac{1}{D} (U \sin \theta + V);$$

$$2^{\circ} \text{ En amont. } \dots \dots \frac{1}{D} (-U \sin \theta + V);$$

$$3^{\circ} \text{ En aval } \dots \dots \frac{1}{D} (U \sin \theta - V).$$

Mais nous avons admis que les molécules marchent en toutes directions imaginables (disons maintenant : *après leur percussion contre d'autres molécules*). Le nombre de celles qui, suivant un même angle θ , s'approchent ou s'éloignent de (δx) sera donc proportionnel à la surface d'une zone élémentaire tracée par l'extrémité du rayon incliné de θ .

En partant de là, nous avons pour le nombre réel de percussions :

$$\text{Première catégorie } \dots \dots \frac{2\pi}{D} (U \sin \theta + V) \cos \theta d\theta;$$

$$\text{Deuxième catégorie } \dots \dots \frac{2\pi}{D} (-U \sin \theta + V) \cos \theta d\theta;$$

$$\text{Troisième catégorie } \dots \dots \frac{2\pi}{D} (U \sin \theta - V) \cos \theta d\theta;$$

et c'est par ces trois nombres que nous devons respectivement multiplier nos trois catégories de force vive ci-dessus. — Il vient ainsi :

$$\text{Première catégorie } \dots \dots \frac{2\pi\mu(\delta x)}{D} \int [(U \sin \theta + 2V)^2 - U^2 \sin^2 \theta] (U \sin \theta + V) \cos \theta d\theta;$$

$$\text{Deuxième catégorie } \dots \dots \frac{2\pi\mu(\delta x)}{D} \int [(-U \sin \theta + 2V)^2 - U^2 \sin^2 \theta] (-U \sin \theta + V) \cos \theta d\theta;$$

$$\text{Troisième catégorie } \dots \dots \frac{2\pi\mu(\delta x)}{D} \int [(U \sin \theta - 2V)^2 - U^2 \sin^2 \theta] (U \sin \theta - V) \cos \theta d\theta.$$

Il est aisé de reconnaître entre quelles limites nous devons prendre ces intégrales pour avoir la dépense de force vive opérée par suite du mouvement de notre plaque.

Nous disons que tous les atomes de la première catégorie peuvent frapper le plan en amont. La première intégrale doit donc être prise depuis 0° à 90° , ou $\frac{1}{2}\pi$.

Les atomes en amont que *poursuit* la plaque ne peuvent être atteints que si $V > U \sin \theta$; la seconde intégrale doit donc être prise de 0 ou $\sin \theta = 0$ à $\sin \theta = \left(\frac{V}{U}\right)$.

Enfin les atomes qui *poursuivent* (∂x) ne l'atteignent qu'à partir de $U \sin \theta > V$. La troisième intégrale doit donc être prise de $\sin \theta = \left(\frac{V}{U}\right)$ à $\sin \theta = 1$.

Il vient ainsi, en achevant les calculs et réunissant en un seul terme A les divers facteurs constants,

$$\text{Première catégorie} \dots \int_0^{\frac{1}{2}\pi} AV(U \sin \theta + V)^2 \cos \theta d\theta = AV \left[\frac{1}{3} U^2 + UV + V^2 \right];$$

$$\text{Deuxième catégorie} \dots \int_0^{\sin \theta = \left(\frac{V}{U}\right)} AV(-U \sin \theta + V)^2 \cos \theta d\theta = AV \left[\frac{4}{5} \left(\frac{V}{U}\right) V^2 \right];$$

$$\text{Troisième catégorie} \dots \int_{\sin \theta = \left(\frac{V}{U}\right)}^{\sin \theta = 1} AV(U \sin \theta - V)^2 \cos \theta d\theta = -AV \left[\frac{1}{5} U^2 - UV + V^2 - \frac{4}{5} \left(\frac{V}{U}\right) V^2 \right].$$

En faisant la somme de ces trois valeurs, il vient pour le travail dépensé par unité de temps par suite du mouvement de la surface :

$$F = \frac{1}{2} \left[2AV \left(\frac{V}{U}\right) \left(U^2 + \frac{4}{5} V^2 \right) \right].$$

D'où il résulte pour la valeur de la résistance qui naît du mouvement de (∂x) :

$$R = A \left(\frac{V}{U}\right) \left(U^2 + \frac{4}{5} V^2 \right) = AV \left[U + \frac{4}{5} \left(\frac{V}{U}\right) V \right].$$

La forme de cette équation est un peu différente de celle à laquelle j'étais arrivé dans mon Mémoire de 1882. La raison en est que je n'avais pas tenu compte des molécules de la seconde catégorie, de celles que poursuit le plan (∂x) et qu'il atteint quand la vitesse $V > U \sin \theta$. Mon ami DWELSHAUVERS-DERY m'a rendu attentif à cette omission et m'a permis de combler ainsi une lacune qui n'est pas sans importance. Qu'il reçoive ici tous mes remerciements.

L'équation précédente peut se mettre sous la forme

$$R = AV \left[U + \frac{1}{3} \left(\frac{V}{U} \right) V \right],$$

et si l'on y fait V très petit par rapport à U , on a simplement :

$$R = AUV.$$

C'est l'équation que j'avais donnée, et elle était alors suffisamment approximative, puisque, dans mes expériences, la valeur de V avait toujours été relativement petite. Quoi qu'il en soit, on voit que la précédente analyse, à laquelle on ne peut plus faire aucune objection plausible, conduit au même résultat général, à savoir :

Que la résistance des gaz serait une fonction de température, si la Théorie cinétique était l'expression de la vérité.

On voit que, bien contrairement à l'assertion de M. CLAUSIUS, j'ai parfaitement tenu compte de toutes les circonstances possibles et que j'ai de plus indiqué nettement dans quelles limites les intégrales doivent être prises. Le rôle perturbateur qu'on pourrait faire jouer aux chocs des atomes entre eux est ici à rejeter complètement. Qu'un atome, avant de frapper le plan ou d'être frappé par lui, ait parcouru un *million* de mètres librement ou que par suite du conflit avec les autres atomes, il n'ait parcouru librement qu'un *dix-millième* de millimètre, le résultat de son action sur le plan ne dépend que de sa *vitesse* et de sa *direction actuelles*, pendant la durée négligeable de la

percussion. C'est cette direction actuelle que représente dans mes équations l'angle θ , dès lors correct, et si l'on admet que, toujours par suite des chocs variés, les vitesses des atomes soient variées aussi à l'infini, l'égalité de condition

$$MU_m^2 = mU_1^2 + mU_2^2 + mU_3^2 + \dots$$

nous permet en toute hypothèse de substituer la somme constante U_m à toutes ses composantes U_1, U_2, U_3, \dots dans les trois systèmes d'intégrales ci-dessus. Cette substitution ne pourra tout au plus altérer que les coefficients constants des trois sommes, mais elle ne pourra en rien modifier la *forme* des sommes mêmes.

Il n'est pas le moins du monde nécessaire non plus d'admettre que les atomes (ou les molécules) du gaz frappent *tous* le plan qui, par son mouvement, modifie et leurs directions et leurs vitesses. Quelque idée que l'on ait des dimensions de l'atome, et pourvu qu'on n'en fasse pas un infiniment petit, il est impossible que cette généralité de chocs ait lieu effectivement. Bien avant que le plan ait atteint ceux qui viennent vers lui ou qui le fuient en amont, ils peuvent avoir été heurtés par ceux qui viennent de se trouver en contact immédiat avec le plan, et leur direction, tout comme leur vitesse, peut être modifiée. C'est ce qui a lieu en réalité, et indépendamment de toute théorie explicative, et la seule différence qui existe en ce sens entre les données des deux Théories, cinétique et dynamique, c'est que la cause de la propagation de l'action du plan, en amont, est, dans l'une des Théories, l'élasticité du fluide et, dans l'autre Théorie, la vitesse de la percussion.

En un mot, la multiplicité des chocs interatomiques, la diversité des directions et des vitesses qui en résulte, la *confusion* dont on me reproche de n'avoir pas tenu compte, ne peuvent en rien modifier les résultats généraux de l'analyse ci-dessus, ne peuvent par conséquent nous empêcher de conclure que :

En Cinétique, la résistance des gaz au mouvement des corps qui y sont plongés est une fonction de la température, ce qui est formellement contredit par l'expérience.

Le phénomène du choc d'une veine gazeuse étant, comme M. CLAUSIUS le montre fort bien lui-même, absolument identique à celui du choc d'un plan contre les parties d'un gaz en repos, je puis, en partant de ce qui vient d'être dit, me permettre d'abrégier considérablement ma réponse à la partie la plus étendue de la critique qui m'est opposée.

.

« Après nous être ainsi rendu compte de la signification du cas idéal (relatif au choc des gaz), nous allons le traiter mathématiquement. Considérons une molécule, dont les mouvements moléculaires sont parallèles à la direction du courant, et qui soit amenée assez près de la plaque par le courant d'air progressif pour qu'elle commence, par suite de ses mouvements moléculaires, à l'atteindre. Non seulement elle choquera une fois la plaque et rebondira, mais, après avoir rebondi et être entrée dans le courant rétrograde, elle reviendra rebondir une seconde fois contre la plaque et sera de nouveau renvoyée dans le courant progressif; elle reviendra une troisième fois rebondir contre la plaque pour rentrer dans le courant rétrograde, et cette succession de phénomènes, accompagnés chaque fois d'un rebondissement, se répétera jusqu'à ce que le courant rétrograde ait amené la molécule assez loin de la plaque pour qu'elle ne puisse plus l'atteindre dans ses mouvements moléculaires. Le nombre de chocs de la molécule contre la plaque sera d'autant plus grand que la fraction $\left(\frac{U}{V}\right)$ est elle-même plus grande.

» La surface-limite de la plaque joue ici le même rôle que le plan perpendiculaire que nous supposons tout à l'heure couper le courant; avec cette différence qu'au lieu de traverser la plaque, les molécules rebondissent sur elle. Ici encore, on peut admettre que le nombre des chocs est représenté par un nombre impair, les chocs, faisant passer la molécule du courant progressif dans le courant rétrograde, devant être d'une unité plus nombreux que ceux dans lesquels s'effectue le passage inverse. Il est à remarquer, en outre, que les premiers chocs s'effectuent avec une vitesse $(U+V)$, tandis que, pour les derniers, c'est la vitesse $(U-V)$ qui a lieu; cette dernière joue, comme

vitesse positive, dans le courant rétrograde, le rôle de celle qui se présente comme vitesse négative ($-U + V$) dans le courant progressif.

» Cette circonstance, que chaque molécule vient plusieurs fois choquer la plaque, a échappé à M. HIRN, parce qu'il a admis que les molécules se meuvent en ligne droite sans se troubler mutuellement, jusqu'à ce qu'elles rencontrent une paroi solide, d'où il suivrait que chaque molécule ne frapperait qu'une fois la plaque pour l'abandonner aussitôt. Dans ces circonstances il ne pouvait attribuer d'influence sur la pression qu'à la vitesse ($U + V$) qui avait lieu lors du premier choc. »

.

L'argument principal, en quelque sorte même unique, de M. CLAUSIUS, consiste, on le voit, à dire que j'ai à tort introduit dans mes équations le terme ($U + V$) seulement, et qu'il fallait aussi y introduire le terme $-(U - V)$, ou $-(V - U)$, ce qui fait disparaître U (c'est-à-dire la température) du résultat final donnant l'action du choc contre le plan fixe.

Je comprends très bien l'utilité algébrique de l'introduction du terme ($V - U$) dans les équations, pour l'élimination, toujours algébrique, de U . Mais comme physicien, j'avoue avoir quelque peine à concevoir comment une veine gazeuse, dirigée au besoin dans le vide le plus complet (car l'expérience serait possible), comment cette veine, dis-je, pourrait, avant le choc, contenir autant de particules allant à rebours du courant qu'il y en a allant dans le sens du courant, avec la vitesse U ; ni surtout comment, après le choc contre un plan fixe, les molécules pourraient posséder autre chose que la vitesse complètement négative $-(U + V)$, diminuée comme on voudra d'ailleurs par suite de l'obliquité des chocs de certaines d'entre elles. — Dans ma réponse à M. FOLIE, j'ai fait moi-même les modifications nécessaires à ma première rédaction, pour la mettre, ce me semble, à l'abri d'une critique fondée.

Je n'ai jamais admis un instant que, dans la réalité, toutes les molécules doivent aller frapper le plan résistant; je dis simplement que les choses se passent comme si cela avait lieu, ce qui physiquement est fort différent.

Certes une même molécule, qui rebondit après avoir frappé l'obstacle, peut être ramenée en arrière pour frapper encore une fois, et ainsi des milliers de fois, avant de sortir du champ d'action. Mais par quoi est-elle repoussée? — Par d'autres molécules dont elle prend ainsi la place et dont elle ne peut recevoir ni plus ni moins que ce qu'elles possèdent. Ces alternatives traduisent la forme du phénomène, *elles le peignent aux yeux*, mais elles ne peuvent altérer la grandeur des effets dynamiques. Il me semble qu'il suffit d'énoncer ce fait pour le démontrer. En un mot donc, il en est ici absolument de même que pour le choc d'un plan en mouvement contre les parties d'un gaz en repos.

En ce qui concerne les objections qu'on peut faire quant à la confusion qui se produit dans la veine fluide en avant de la plaque résistante, la réponse est la même.

Il n'est évidemment pas nécessaire d'admettre que *toutes* les molécules frappent directement l'obstacle; cela est, en toute hypothèse, impossible; mais les molécules qui ont heurté le plan repoussent, en rebroussant chemin, celles qui arrivent, et ainsi de suite, jusqu'à une certaine distance, de sorte que la veine s'étale en tous sens en fuyant à angle droit. Cette confusion de chocs ne peut en rien altérer l'effet final produit; c'est toujours le plan qui *force une somme donnée* de molécules à se détourner de leurs directions initiales, soit par contact direct, soit par réflexion les unes contre les autres, et l'effet mécanique, la pression qui résulte de là, ne saurait être en rien modifiée par suite de la confusion des mouvements, si grande qu'on veuille la supposer.

§ V.

Suite de la discussion des critiques de M. Clausius.

Objection III

tirée de l'étude de l'écoulement des gaz dans un espace relativement vide.

Je passe au troisième et dernier ordre d'objections que M. CLAUSIUS a faites à mes conclusions. Il concerne mes expériences sur l'écoulement de l'air d'un espace où il est comprimé dans un autre où il est excessivement

raréfié. La description de ces expériences a paru au complet dans le numéro de mars 1886 des *Annales de Chimie et de Physique*, à Paris ¹. Je n'ai pu en indiquer que la substance dans mon dernier Mémoire à l'ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES DE BELGIQUE, et c'est de ce résumé seulement qu'a eu connaissance M. CLAUSIUS, quand il a écrit sa réponse. Si, parmi les faits que je cite dans le travail des *Annales*, il s'en trouvait par hasard qui fussent de nature à modifier les opinions de mon critique, je m'empresse de dire que sa responsabilité serait entièrement à couvert et que personne ne serait en droit de lui faire le moindre reproche. Je donne d'abord en entier cette partie de la critique, me permettant seulement de mettre en italiques les passages sur lesquels j'aurai à appeler particulièrement l'attention du lecteur.

.....
 « Quant à l'écoulement des gaz, M. HIRN a trouvé une concordance satisfaisante entre les résultats de ses expériences et les formules usuelles de la vitesse d'écoulement. Mais il lui semble que, suivant la Théorie cinétique, on ne doit pas appliquer cette formule à la vitesse V , mais l'expression $\sqrt{2\alpha UV + V^2}$, dans laquelle α représente de nouveau la fraction de la totalité des molécules, dont le mouvement moléculaire est parallèle au courant gazeux. C'est dans le manque de concordance entre cette expression et la formule que M. HIRN croit trouver une objection à la Théorie cinétique.

» Le radical précédent est le même que celui qu'il a employé dans la généralisation rappelée ci-dessus qu'il a faite de son analyse relative à la détermination de la pression exercée par le courant d'air contre la plaque. Sa déduction repose sur ce qu'il n'a fait usage, parmi les mouvements parallèles au courant gazeux, que de ceux de vitesse $(U + V)$ et non de ceux, en nombre égal, de vitesse $(-U + V)$. En employant ces dernières, le terme $2\alpha UV$ disparaîtrait du radical. Il s'agit donc de nouveau de l'erreur qui a déjà été signalée et dont la réfutation ne nous conduirait qu'à répéter ce que nous en avons dit ci-dessus.

¹ RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LA LIMITE DE LA VITESSE QUE PREND UN GAZ QUAND IL PASSE D'UNE PRESSION A UNE AUTRE PLUS FAIBLE ; par G.-A. HIRN. — (*Annales de Chimie et de Physique*, 6^{me} série, tome VII, mars 1886, et chez M. GAUTHIER-VILLARS, à Paris.)

» Je crois devoir dire encore quelques mots d'une affirmation relative à l'écoulement des gaz, dans laquelle il s'agit de considérations d'un autre ordre.

» Dans les expériences sur l'écoulement décrites dans le Mémoire, la différence de pression qui produisait le courant d'air était toujours faible, relativement à la pression qui régnait tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du vase. La pression extérieure était généralement celle de l'atmosphère et celle de l'intérieur ne la dépassait que 10 à 27 millimètres de mercure ; aussi les vitesses d'écoulement de l'air étaient-elles inférieures à 100 mètres.

» Par contre, dans une note (p. 117) M. HIRN cite des expériences faites plus tard, dans lesquelles il dit avoir obtenu une vitesse de 5700 mètres en diminuant la pression extérieure jusqu'à 10 millimètres de mercure, tandis que la pression intérieure restait environ d'une atmosphère.

» Dans l'addition à son Mémoire (p. 198), M. HIRN complète cette communication et fixe la vitesse d'écoulement à 4266 mètres. Suivant la Théorie cinétique, les mouvements moléculaires ne peuvent avoir dans l'air à la température donnée qu'une vitesse moyenne d'environ 500 mètres, et ils sont, par conséquent, impuissants à fournir une vitesse dépassant 4000 mètres. Aussi M. HIRN croit-il avoir trouvé un argument décisif dans cette expérience et il termine son exposé en disant : « Cette considération » devient un argument mortel contre la Théorie cinétique » telle qu'elle a été établie jusqu'ici. »

(A) » On doit naturellement, après cela, avoir le plus vif intérêt à savoir comment M. HIRN a mesuré cette grande vitesse. Mais, en lisant la suite de son travail, on verra qu'il n'a pas du tout effectué de mesures de vitesse : il a seulement mesuré la quantité d'air écoulée du vase pendant l'unité de temps et en a déduit la vitesse par des conclusions théoriques.

» Les expériences ont montré que si l'on diminue de plus en plus la pression extérieure, la pression intérieure restant invariablement de 750 millimètres, la quantité d'air qui s'écoule ne croît que jusqu'au moment où la pression extérieure s'est abaissée jusqu'à 400 millimètres. En diminuant davantage la pression extérieure, l'écoulement reste à peu près constant.

» Cette circonstance que la quantité de gaz qui s'écoule tend vers un maximum, à mesure que la pression diminue, sans pouvoir le dépasser, concorde très bien avec la Théorie cinétique. Suivant cette dernière, en effet, on doit admettre que, si la pression extérieure est zéro, les molécules, arrivées à l'orifice par suite de leurs mouvements moléculaires et du courant formé à proximité de l'ouverture, s'échappent uniquement avec la vitesse qu'elles ont précisément au moment où elles atteignent à l'orifice.

» Dans ces circonstances, une certaine quantité d'air, déterminée par la densité et les mouvements intérieurs, abandonnera l'ouverture pendant l'unité de temps; c'est elle qui constitue le maximum. De plus, il est fort possible que la quantité écoulée ne croisse pas continuellement d'une manière régulière avec la diminution de la pression extérieure, mais qu'elle se rapproche, au contraire, relativement vite du maximum, de sorte que le décroissement de la pression extérieure, en se continuant, n'amènerait alors plus de changement notable dans cette quantité.

» Quant au processus d'écoulement lui-même, il différera suivant qu'il aura lieu par une pression extérieure très faible ou par une pression extérieure forte. Dans le premier cas il ne se formera pas un courant à peu près cylindrique, dans lequel l'air aura déjà, près de l'orifice, la densité nécessaire pour égaliser la différence entre la pression à l'intérieur du courant et la pression extérieure. Par suite des diverses directions prises par les molécules au sortir de l'orifice, le courant s'étalera, au contraire, rapidement, et, comme les molécules restent trop peu de temps aux environs de l'ouverture pour permettre à la pression de s'égaliser déjà en ce point, leurs distances réciproques au voisinage de l'orifice seront entièrement différentes de celles qui existeraient si cette égalisation pouvait se produire.

(B) » *Ces distances dépendent presque uniquement de l'état de l'air à l'intérieur du récipient et fort peu de la pression extérieure; d'où il suit que la densité de l'air qui s'écoule peut être considérable près de l'orifice, malgré la faible pression extérieure. Si M. HIRN avait tenu compte de ces circonstances, il aurait pu produire le résultat de ses expériences comme étant une confirmation de la Théorie cinétique des gaz. Au lieu de cela, il présente de tout autres considérations.*

» Dans le cas d'une forte pression extérieure, on peut déterminer, à l'aide des lois ordinaires, au moyen du rapport entre la pression intérieure et la pression extérieure, la densité δ que l'air qui s'écoule prend lors de l'égalisation de pression au voisinage de l'orifice, en fonction de la densité δ_0 dans le récipient. Si, en outre, la section ms du courant et la quantité d'air écoulé pendant l'unité de temps sont supposées connues, on pourra calculer de ces dates la vitesse V . Soit W_0 le volume, mesuré dans le récipient, de l'air écoulé pendant l'unité de temps, on pourra exprimer par $\frac{W_0\delta_0}{\delta}$ son volume accru par la dilatation. D'autre part, si le courant restait constant, l'air qui s'écoule pendant l'unité de temps formerait un cylindre de section ms et de longueur V , dont le volume est msV .

» On a donc, en égalant ces deux expressions du volume,

$$msV = \frac{W_0\delta_0}{\delta},$$

d'où l'on tire,

$$V = \frac{W_0\delta_0}{ms\delta}.$$

» Cette manière de calculer, admissible seulement pour une forte pression extérieure, est également appliquée par M. HURN dans le cas d'une pression intérieure de 750 millimètres et d'une pression extérieure de 10 millimètres, quoique alors le mode d'écoulement soit entièrement différent. Il conserve pour la section du courant la valeur ms qu'il a déterminée pour une forte pression extérieure, en tenant compte de la contraction, puis il calcule le rapport des densités $\frac{\delta}{\delta_0}$ également au moyen de la même formule, qui n'est applicable que dans le cas d'une forte pression extérieure, ce qui est inadmissible dans le cas actuel, puisque cette formule suppose l'égalisation de la pression. Comme la valeur de $\frac{\delta}{\delta_0}$ déduite de cette formule est très petite et qu'on l'a utilisée dans l'équation précédente, la valeur V tirée de cette dernière deviendra excessivement grande, soit 4266 mètres. Si la pression était nulle, ce calcul assignerait même à V une valeur infiniment grande.

Mais il est clair qu'on ne peut pas accorder la moindre valeur à des nombres qui ont été calculés de cette manière. »

.

Les arguments par lesquels M. CLAUSIUS essaie de montrer que mes conclusions sont fausses, ou que tout au moins elles ne prouvent rien, sont incontestablement spécieux et même captieux. Je n'ai pas besoin de dire que je ne prends ces deux épithètes qu'en bonne part et comme équivalant à saisissant, entraînant ; comme supposant chez le lecteur une grande attention pour n'être pas séduit. Ces arguments ont cet immense avantage de poser nettement la question et de nous permettre de tracer définitivement la barrière infranchissable qui sépare la Théorie cinétique de la Théorie dynamique : barrière de l'existence de laquelle, soit dit en passant, bien des cinétistes ne semblent pas même se douter, alors que pour interpréter certains faits ils recourent à des équations qui appartiennent exclusivement à la Théorie opposée et sont impossibles en Cinétique. En ce sens, la discussion à laquelle va nous conduire la critique de M. CLAUSIUS est à la fois une des plus délicates, mais aussi des plus intéressantes qui se puissent présenter en Physique.

C'est la partie en italiques de l'alinéa (A), page 31, qui sert de pivot principal à toute la critique. — Certes je n'ai pas mesuré directement les vitesses de l'air à la partie la plus contractée de la veine fluide qui se précipite dans l'espace relativement vide. Il serait, dans l'état actuel de la Science expérimentale, absolument impossible de mesurer des vitesses de gaz allant à quatre ou cinq mille mètres. Je n'ai pu que *calculer* cette vitesse ; la question est seulement de savoir si ma méthode de calcul est correcte ou non. Cette méthode est fort simple. — Le gaz était jaugé rigoureusement à une pression et à une température connues ; il s'échappait par un orifice dont la section était déterminée avec toute l'approximation désirable. On avait donc sa vitesse prise à sa densité dans le gazomètre. Avec la presque totalité des Analystes qui se sont occupés de ce sujet, j'ai admis que le gaz, à mesure que baisse la pression à laquelle il est soumis aux approches de l'orifice, se

détend, c'est-à-dire augmente de volume et se refroidit; comme expression mathématique de cette détente, j'ai admis l'équation bien connue de Thermodynamique

$$W = W_0 \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{c_v}{c_p}},$$

dans laquelle W_0 est le volume spécifique initial d'un gaz à la pression P_0 et W le volume que prend ce gaz quand, sans recevoir ni perdre de chaleur du dehors, il passe de la pression P_0 à la pression $P < P_0$, en rendant tout le travail externe possible. La question se réduit à savoir :

- 1° Si l'équation de Thermodynamique est ici applicable ;
- 2° Si l'on peut admettre que le gaz, au moment où il acquiert sa plus grande vitesse, ne reçoit ou ne perd effectivement pas de chaleur du dehors ;
- 3° Enfin si l'on est en droit d'admettre qu'à la section où la vitesse est arrivée à son maximum, le gaz n'est effectivement plus soumis qu'à la pression du réservoir où il se jette.

Dans le cas d'une réponse affirmative à ces trois questions, la vitesse du gaz devient évidemment

$$v = v_0 \left(\frac{W}{W_0} \right) = v_0 \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{c_v}{c_p}},$$

v_0 étant la vitesse initiale mesurée directement ; et cette vitesse calculée est aussi correcte que les neuf dixièmes des inconnues calculées avec les équations de la Thermodynamique, équations dont, toutes théoriques qu'elles sont, personne n'a jamais révoqué en doute l'exactitude, bien que la valeur calculée de l'inconnue ne puisse non plus être vérifiée directement. On n'a jamais douté, par exemple, de l'exactitude de la belle équation de M. CLAUSIUS relative au volume spécifique d'une vapeur saturée, et pourtant en Physique appliquée, il est à peu près impossible de déterminer directement et exactement ce volume, de façon à vérifier l'équation.

Nous n'avons pour le moment à nous occuper que de la première des conditions ci-dessus ; nous n'avons à résoudre qu'une seule question : le gaz,

en passant d'un réservoir à l'autre, subit-il une détente proprement dite, c'est-à-dire une augmentation de volume avec chute de pression, accompagnée d'un abaissement au moins temporaire de température, et d'un travail correspondant ?

Si une telle détente a lieu réellement, ma méthode de calcul cesse d'être fictive et devient, au contraire, aussi rationnelle que n'importe laquelle des équations de la Thermodynamique. Je montrerai bientôt que ce n'est qu'à l'aide de la plus étrange des pétitions de principe qu'on peut déclarer *a priori* que l'équation exponentielle ci-dessus est ici hors lieu et que son emploi ne donne que des résultats fautifs (*théoriques !!!*).

Mais n'anticipons pas. C'est ici que va se montrer la différence radicale existant entre la Théorie cinétique des gaz et leur Théorie dynamique.

Déjà la cause même du mouvement est autre dans les deux Théories.

En Cinétique, un gaz qui se jette d'un réservoir où il est comprimé dans un autre vide, possède tout son mouvement, antérieurement à l'écoulement. Celui-ci a lieu parce que les molécules, en arrivant à une partie *dénudée* des parois, à *l'orifice*, peuvent suivre leur route librement. Non seulement la moyenne MU^2 (M représentant la masse totale des molécules) reste constante, si l'on considère les deux réservoirs ensemble ; mais la force vive de deux masses égales prises dans les deux réservoirs ne peut pas même différer temporairement d'un réservoir à l'autre, pourvu que l'on considère dans chacun un nombre suffisant de molécules à la fois.

En Théorie dynamique, au contraire, le mouvement ne peut commencer qu'au moment même où les deux réservoirs sont mis en rapport. Le mouvement de chaque partie infinitésimale est dû à la pression continuellement exercée sur elle par suite de l'élasticité de la totalité du gaz.

Mais nous arrivons à une comparaison encore plus frappante.

En Cinétique, les molécules étant indépendantes les unes des autres et la pression exercée par elles ne relevant que de leur vitesse en toutes directions possibles, la densité n'a en quelque sorte plus rien de commun avec la pression. Non seulement il ne se fait pas nécessairement une détente, pendant qu'un gaz passe d'une pression à une autre, mais il est facile de montrer les cas où une détente *ne peut même pas* avoir lieu. — Si nous

supposons, par exemple, que de l'air à zéro s'écoule dans le vide par un tube de section égale sur toute son étendue, les molécules, à une très petite distance de l'entrée de ce tube, prendront toutes une même direction parallèle à l'axe, avec leur vitesse normale de 485 mètres; il n'y aura plus aucune raison imaginable pour qu'elles s'écartent entre elles, et la densité du gaz pourra être presque identique à celle qu'il a dans le réservoir. — C'est au surplus ce que M. CLAUSIUS montre fort bien lui-même (voyez alinéa (B), page 32). — La pression en arrière du courant et sur les flancs sera donc absolument nulle.

Dans la Théorie dynamique, il ne peut en être ainsi, et il existe, au contraire, une relation directe et continue entre la pression et la densité. Lorsque, par exemple, l'écoulement de l'air se fait dans les conditions précédentes, le gaz, à mesure qu'il avance dans le tube de section constante, est soumis à une pression de plus en plus faible, qui, pour n'être pas finalement celle du réservoir relativement vide, n'en est pourtant pas moins très inférieure à celle du réservoir de compression. Le volume spécifique et par conséquent la vitesse croissent donc continuellement, et quelle que soit la loi de cet accroissement, on a toujours :

$$v = v_0 \left(\frac{W}{W_0} \right),$$

V_0 et W_0 étant la vitesse et le volume spécifique initiaux, V et W les vitesses et les volumes qui se correspondent en chaque point de la longueur du tube. L'élasticité du gaz dans le réservoir de compression, comme dans le tube, est employée à produire l'accélération des particules.

En Cinétique, pour le cas d'écoulement que nous considérons, le mouvement des molécules ne change qu'en direction et nullement en intensité, quand le gaz quitte le réservoir de compression, traverse le tube de section constante et arrive enfin dans le réservoir relativement vide : *la température reste donc invariable partout*. Nous nous trouvons même ici devant un dilemme de contradiction des plus décisifs. Si, par exemple, les molécules s'écartaient les unes des autres à mesure qu'elles avancent dans le tube, le volume spécifique du gaz irait aussi en croissant, *ainsi que la vitesse*, autre-

ment dit la température; il se produirait donc un accroissement de température par suite d'un accroissement de volume, ce qui est absurde. Si, au contraire, on suppose que les molécules se rapprochent en cheminant dans le tube, le volume spécifique, la vitesse et par suite la température baisseraient en valeur, ce qui est encore contradictoire dans les termes mêmes.

En Théorie dynamique, il en est tout autrement. Nous disons que c'est l'élasticité du gaz qui détermine le mouvement des molécules : il faut donc de toute nécessité que la Force qui est la cause déterminante de cette élasticité s'abaisse en intensité dès que le mouvement est établi et tant qu'il dure. Dans les conditions d'écoulement que nous avons admises précédemment, le gaz, disons-nous, se détend à mesure qu'il avance dans le tube. A cette détente répond un accroissement direct et proportionnel de vitesse. Comme la température est, en Théorie dynamique, le représentant de la force d'élasticité, il faudra de toute nécessité qu'elle s'abaisse proportionnellement au travail mécanique ou à la force vive produite. Si le mouvement des molécules gazeuses parvenues dans le réservoir vide *durait*, l'abaissement de température serait définitif aussi; mais les frottements, les chocs, etc., ramènent rapidement le repos dans la masse dilatée; le mouvement détruit ainsi est employé à ramener la force d'élasticité, la chaleur, à son intensité, à sa température primitives.

§ VI.

Suite et fin de la discussion des critiques de M. Clausius.

Point de vue expérimental.

Écoulement de l'air dans un espace relativement vide.

Nous disposons donc maintenant d'un procédé expérimental pour reconnaître d'une façon sûre, je dirai, éclatante, si la Cinétique des gaz est une vérité ou une erreur.

Si, dans la veine d'écoulement, il ne se produit, malgré la chute de pression, ni accroissement de volume spécifique, ni abaissement de tem-

pérature, nous pouvons être certains que les molécules dans la veine ne possèdent que la vitesse normale répondant à la constitution même du gaz. Et c'est désormais la Théorie cinétique qui est l'expression de la vérité. La méthode de calcul par laquelle j'ai voulu établir la vitesse tombe à faux et devient même absurde.

Si, au contraire, nous constatons dans la veine une détente proprement dite, c'est-à-dire un accroissement de volume spécifique avec chute de température, accompagnant la chute de pression, nous pourrions être tout aussi certains que c'est la Théorie dynamique qui répond à la réalité des phénomènes, et ma méthode de calcul des vitesses cesse d'être une fiction.

Je me permets de faire remarquer, en passant, le cercle vicieux que l'on décrirait, la pétition de principe où l'on tomberait, si l'on disait : en Cinétique, la densité et la vitesse, dans la veine d'écoulement, sont constantes ; donc votre méthode de calcul est fautive, donc la Cinétique est juste. — Ce serait là tout simplement prendre pour preuve ce qui précisément est à prouver.

La question telle qu'elle se présente désormais à nous est en quelque sorte résolue en même temps qu'elle est posée. J'interviens de nouveau comme expérimentateur.

Dans sa belle théorie des vapeurs, M. CLAUSIUS a démontré dès 1852, si je ne me trompe, que la vapeur d'eau saturée doit se condenser partiellement, se troubler, lorsque, sans recevoir ni perdre de chaleur du dehors, elle se détend en poussant en avant un piston faisant continuellement équilibre à la pression actuelle. Sans avoir alors encore connaissance des travaux de M. CLAUSIUS, j'ai moi-même, vers cette époque, constaté le fait directement.

D'un autre côté, la vapeur d'eau saturée qui se précipite d'une chaudière où elle est tenue à pression constante, à cinq atmosphères, je suppose, dans un espace où elle est tenue aussi à pression constante, mais inférieure, à une atmosphère, par exemple, cette vapeur, disons-nous, reste *surchauffée* ; sa température reste à $137^{\circ},72$, c'est-à-dire à $37^{\circ},72$ au-dessus du point de saturation à une atmosphère. Sans le travail interne qui s'y opère, cette température serait même de $152^{\circ},22$, comme celle de la vapeur à cinq atmo-

sphères. Tout est conforme à la Théorie cinétique, tout aussi bien qu'à la Théorie dynamique. Si, au réservoir où la pression est d'une atmosphère, nous substituons un condenseur où la pression serait tenue à un cinquième d'atmosphère, par exemple, comme cela est réalisable, il n'y aurait rien d'essentiel de changé aux phénomènes; l'abaissement de la température serait plus grand que précédemment, parce que le travail interne serait plus grand, mais la vapeur serait toujours fortement surchauffée dans l'enceinte où elle se précipite.

Il semble donc qu'on pourrait encore soutenir, comme le fait M. CLAUSIUS quant à l'air, que la densité de la veine gazeuse, au moment où elle s'échappe, est presque la même que dans la chaudière et que par conséquent la vitesse moléculaire normale à $152^{\circ},22$ pour la vapeur, reste constante. — Un examen plus attentif du phénomène nous amène pourtant promptement à d'autres idées. Tandis que la vapeur saturée à $152^{\circ},22$ tout comme la vapeur surchauffée qui remplit le condenseur, est parfaitement *limpide*, la veine, au moment où elle s'échappe du réservoir de compression (de la chaudière), est *fortement trouble*; elle contient de l'eau en poussière, absolument comme la vapeur qui se détend sous un piston; ainsi, non seulement la pression a baissé, mais le volume s'est accru, il s'est opéré une détente proprement dite, dont l'effet mécanique a été d'accroître considérablement la vitesse des molécules de vapeur, et d'abaisser la température. Il ne peut à cet égard s'élever le moindre doute. Si l'on désigne par S la section effective de l'orifice d'échappement, par Y_0 le volume écoulé, de vapeur à cinq atmosphères, la vitesse, à cette densité, est :

$$v_0 = \left(\frac{Y_0}{S} \right).$$

Si l'on désigne par W_0 le volume spécifique de la vapeur à cinq atmosphères et par W le volume spécifique répondant à la partie la plus contractée de la veine, on a, pour la vitesse en cette section,

$$v = v_0 \left(\frac{W}{W_0} \right).$$

Je suis bien loin de dire que la vapeur, dans la partie la plus trouble de la veine, soit tombée à la pression ambiante et ait pris le volume spécifique et la température qui y répondent; je pense, au contraire, qu'il ne peut en être ainsi. Mais, d'après le trouble considérable de la veine, il est du moins certain que la chute de température et l'accroissement du volume W sont très grands. Le seul fait capital sur lequel il y ait à appuyer — et il suffit à lui seul pour réfuter la Cinétique, — c'est que la veine de vapeur éprouve, au moment où elle passe de la pression P_0 à une autre P , une détente véritable, un *accroissement de volume* avec abaissement de température, dont la conséquence nécessaire est une *accélération* du mouvement de molécules. Si l'on a U_0 dans le réservoir de compression (chaudière), on a nécessairement $U > U_0$ dans la veine, pour la vitesse moléculaire.

Ce que nous disons du cas particulier de la vapeur d'eau s'applique *a fortiori* au cas de l'écoulement des gaz très éloignés de leur point de liquéfaction, et il serait presque inutile de discuter. Comme je tiens cependant à laisser autant que possible parler les faits, je vais citer quelques expériences nouvelles. Elles sont en petit nombre, j'ai le regret de le dire, mais elles sont caractéristiques et décisives, dans le sens où nous nous plaçons. Elles ont été faites par mon jeune préparateur, ÉM. SCHWOERER, que je remercie ici publiquement; bien que je n'aie pu y assister, je puis en garantir l'entière exactitude.

Dans les expériences que j'ai décrites aux *Annales de Chimie et de Physique*, l'air atmosphérique sec se précipitait, sous la pression atmosphérique constante, dans un réservoir où le gaz était excessivement raréfié au début, mais où la pression s'élevait ensuite très rapidement. Il ne pouvait être question de mesurer des températures ou des pressions dans la veine fluide même. Pour disposer d'un vide continu et satisfaisant, nous avons eu recours au condenseur d'une puissante machine à vapeur marchant *à vide*, autant de temps qu'il était nécessaire pour bien observer. Cette machine, de 300 chevaux, était à deux cylindres, munie d'une *chemise* Watt ou enveloppe à vapeur comprimée; un tuyau d'une grande section conduisait au condenseur la vapeur d'échappement du grand cylindre. En raison de cette énorme section et quand la machine marchait sans donner d'autre travail externe

que celui que coûtait son propre mouvement, c'est-à-dire quand la dépense de vapeur était un *minimum*, le vide, dans ce tuyau, était le même qu'au condenseur.

Si je cite la grandeur et la force du moteur à vapeur, c'est parce que l'état de raréfaction dans le condenseur, quand il y afflue de l'air, dépend des dimensions de la pompe pneumatique. La moindre fuite à cette partie de la machine détermine une diminution dans la qualité du vide, ou, pour parler plus correctement, augmente la pression au condenseur. Avec une machine de petites dimensions, il eût été impossible de laisser affluer au condenseur des volumes d'air un peu notables, sans détruire le vide.

C'est au gros tuyau d'échappement qu'ont été alternativement adaptés les deux ajutages suivants :

I. — ORIFICE A MINCES PAROIS DE 0^m,0040 DE DIAMÈTRE.

(Pl. I, fig. 1.) P, P, plaque de cuivre percée d'un orifice circulaire du diamètre indiqué. T, T, T, T, tube de bronze soudé à cette plaque, concentriquement à l'orifice à minces parois et en rapport avec le tuyau du condenseur par son autre extrémité. S, S, S, S, support à jour adapté en amont à la plaque de cuivre P, P, et servant à maintenir fixe le tube de verre V, V'. Ce tube, par son extrémité effilée pénétrait dans l'orifice et dépassait d'environ 0^m,005 en aval la plaque de cuivre; la partie effilée V' avait à peine 0^m,0005 de diamètre externe; l'autre extrémité V du tube était en rapport avec un manomètre à mercure (M). Une tubulure t, t, soudée au tube T, T, T, T, était en rapport avec un autre manomètre à mercure (N).

II. — AJUTAGE CONICO-CYLINDRIQUE DE 0^m,0040 DE DIAMÈTRE A LA PARTIE CYLINDRIQUE.

(Pl. I, fig. 2.) Cet ajutage était mis en rapport avec le condenseur comme le précédent, les lettres de la figure ont la même signification que pour la précédente. Le tube de verre VV' portant un manomètre par son ouverture externe était effilé avec soin bien également sur une grande longueur (0^m,0005 de diamètre externe). A l'opposé du précédent, ce tube

était mobile et pouvait être plongé à volonté plus ou moins loin dans le tube cylindrique.

Je passe à la discussion des expériences.

La machine étant arrivée à son régime stable de vitesse, le mercure s'élevait dans les deux manomètres (M) et (N). Le baromètre étant à 0^m,730 de hauteur, le manomètre (N) indiquant la raréfaction au condenseur s'élevait, pour les deux ajutages, à 0^m,640. La pression au condenseur était donc de 0^m,09. Avec l'ajutage à minces parois, le manomètre (M) adapté à l'extrémité libre du tube de verre s'élevait à 0^m,655, c'est-à-dire 0^m,015 plus haut que l'autre. Avec l'ajutage cylindrique, les indications du manomètre (M) dépendaient de la position de la pointe effilée dans le tube de conduite de l'air. Ce fait est de la plus haute importance :

La pointe effilée pénétrant à 0^m,015 dans le tube, le mercure s'élevait à 0^m,230 ; la pression indiquée était donc de $(0^m,730 - 0,230) = 0^m,500$. A mesure qu'on avançait la pointe effilée vers l'intérieur, le mercure s'élevait ; quand la pointe était arrivée à fleur de l'extrémité, les deux manomètres se tenaient à la même hauteur 0^m,640 (environ).

Il n'est pas inutile de nous arrêter tout d'abord au sens qu'ont les indications du manomètre (M). Suivant la Théorie cinétique, le mercure s'élève dans le tube manométrique, parce que, par suite de la direction des molécules dans le tube conducteur, il revient moins de molécules vers la pointe effilée qu'il n'y en a qui vont en sens contraire ; l'air du tube du manomètre s'échappe donc par suite du mouvement inhérent à ses propres molécules jusqu'à ce que le nombre de molécules tendant à sortir soit devenu précisément égal à celui des molécules tendant à rentrer. Dans un vide parfait, aucune des molécules se précipitant du tube conducteur dans l'espace libre n'aurait plus de direction opposée au mouvement dans le sens de l'axe de la veine ; le tube manométrique *se viderait alors lui-même complètement* et le mercure s'élèverait exactement à la hauteur barométrique du moment. — Dans la Théorie dynamique, l'explication de l'ascension du mercure en (M) est autre. Ici les molécules de l'air du tube manométrique sont en repos et y restent même à une certaine distance de l'extrémité du tube effilé ; ces molécules en repos, et externes, sont donc frappées continuellement par celles

qui se meuvent en avant dans le tube d'échappement ; elles sont entraînées par elles et remplacées par d'autres de l'intérieur, jusqu'à ce que la différence de la hauteur barométrique et de la hauteur manométrique soit devenue précisément égale à celle qui représente la vitesse du fluide au point où se trouve la pointe effilée. Le *tube de Pitot*, ici employé, indique non pas la pression du gaz, mais la charge capable de produire la vitesse au point où se trouve l'extrémité du tube.

En Théorie dynamique, l'ascension graduelle du manomètre, à mesure que le tube effilé pénètre dans le tube d'écoulement, est bien positivement l'indice d'une détente proprement dite, d'une augmentation de volume et, par conséquent, d'un accroissement de vitesse du gaz. En Cinétique, il faudrait, ce me semble, bien *tourmenter* l'interprétation pour arriver à une conclusion autre, et pour pouvoir soutenir que la densité du gaz reste invariable en dépit de l'ascension manométrique.

Mais je me hâte de parler d'un phénomène, capital pour notre discussion, qui avait lieu pendant l'écoulement du gaz. A partir de son embouchure externe jusqu'à son autre extrémité, le tube d'échappement était *de plus en plus froid*, malgré la chaleur qui affluait précisément à cette extrémité par les pièces métalliques de la machine. En estimant à une quarantaine de degrés la différence de température observée ainsi d'un point à un autre, nous resterons au-dessous de la vérité. Ce refroidissement du tube est l'indice d'un refroidissement bien plus considérable de l'air en mouvement ; il eût été bien plus intense encore, si nous avions pu opérer sur de l'air sec, au lieu de laisser aspirer l'air humide de l'atelier de la machine. La vapeur d'eau présente devait, en effet, se condenser par le refroidissement du gaz et, en cédant ainsi de sa chaleur interne, diminuer considérablement l'abaissement de température de l'air.

Grand ou petit, peu importe, ce refroidissement est la preuve incontestable que l'air, affluant dans le tube, *se détendait à mesure qu'il avançait*. En d'autres termes, c'est la preuve positive qu'à la diminution de pression indiquée par le manomètre correspondaient un accroissement du volume spécifique, une accélération du mouvement des molécules et un travail mécanique consacré précisément à cette accélération et donnant lieu à une

consommation de chaleur. Or une accélération du mouvement moléculaire avec une diminution de température, c'est-à-dire avec un ralentissement du mouvement moléculaire est, en Cinétique, une telle contradiction que la Théorie tombe d'elle-même devant le fait observé. Il résulte de là aussi que la méthode de calcul que j'ai employée pour évaluer la vitesse d'écoulement cesse d'être une fiction et répond, tout au moins *approximativement*, à la réalité des choses.

J'emploie à dessein le terme *approximativement*. On va voir pourquoi une concordance rigoureuse et générale avec les faits est impossible.

§ VII.

**Critique réellement fondée qu'on peut faire
de mes conclusions quant à l'écoulement des gaz dans le vide.
Limites des erreurs possibles.**

Après avoir ainsi répondu à la troisième et dernière critique de M. CLAU-SIUS, et avant de passer à l'énumération des autres objections à la Théorie cinétique des gaz, je vais faire moi-même quelques réflexions critiques indispensables sur ce qui vient d'être dit.

Pendant l'écoulement d'un gaz sous pression constante d'un réservoir en un autre où la pression est moindre ou nulle, il s'opère, disons-nous, une *détente* proprement dite, c'est-à-dire une augmentation de volume répondant à la chute de pression, et accompagnée d'un refroidissement répondant aussi au travail dépensé pour l'accélération du mouvement du gaz. L'emploi de l'équation de Thermodynamique

$$W = W_0 \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{c_v}{c_p}} \dots \dots \dots (\Delta)$$

devient donc, semble-t-il, rationnel; par conséquent l'équation de Weisbach, dont la construction repose directement sur cet emploi, semble devenir

rationnelle aussi. Et pourtant cette équation, je l'ai montré dans mon dernier Mémoire aux *Annales de Chimie et de Physique*, donne des résultats qui ne répondent nullement à la réalité. J'ai discuté longuement cette discordance à la fin de mon Mémoire, sans toutefois en indiquer les raisons. Ces raisons sont très simples, à ce qu'il me semble.

Pour que l'équation (A) puisse s'appliquer correctement, il faut que deux conditions physiques soient remplies :

1° Il faut que le gaz, pendant son écoulement, ne reçoive ni ne perde de chaleur du dehors ;

2° Il faut que la pression, là où existe le *maximum* de vitesse de la veine gazeuse, soit celle du réservoir où afflue le gaz.

Lorsque l'écoulement se fait par un orifice à minces parois, la première condition peut être remplie, du moins à bien peu près, tandis qu'elle ne l'est plus avec un orifice à cylindre un peu long. Le refroidissement du tube, dont j'ai parlé plus haut, nous montre avec quelle rapidité les parois métalliques cèdent de leur chaleur aux gaz, bien contrairement à ce qui avait été admis pendant si longtemps, quant aux gaz et quant aux vapeurs, lorsqu'on construisait la théorie des moteurs thermiques.

La seconde condition, que pourtant la plupart des Analystes ont considérée comme remplie, ne peut en réalité jamais l'être rigoureusement, et l'on accepte plus qu'une hypothèse, on pose une impossibilité, en écrivant :

$$P_x = P_r,$$

P_r désignant la pression du gaz dans le réservoir de raréfaction et P_x sa pression réelle (inconnue) à la partie la plus contractée de la veine d'écoulement à laquelle répond le *maximum* de vitesse. On va voir immédiatement pourquoi.

Dans la construction des équations, les plus diverses d'ailleurs, par lesquelles on a cherché à exprimer le phénomène de l'écoulement des gaz, on a admis implicitement et *a priori* que l'unité de masse écoulée reçoit dans l'unité de temps la vitesse *maxima* due à la pression $P_0 > P_r$ et à la détente du gaz $P_0 \equiv P_r$. En d'autres termes, dans la construction de ces équations,

on a fait abstraction complète du temps et l'on ne s'est occupé que du travail mécanique effectué, considéré en lui-même.

Ce sujet est si important et si intéressant que je crois pouvoir me permettre de développer mon assertion à l'aide d'un exemple bien net.

Occupons-nous de la construction de l'équation de Weisbach. — Désignons par P_0 la pression constante au réservoir de compression, par P_r la pression constante aussi au réservoir de raréfaction, par W_0 le volume spécifique répondant à P_0 et à T_0 , et par W_r le volume spécifique final répondant à P_r et à T_1 (température de la veine fluide). Le travail mécanique exécuté pendant l'écoulement de l'unité de poids de gaz sera évidemment

$$P_0 W_0 + \int_{P_0}^{P_r} P dW - P_r W_r = F.$$

La vitesse *maxima* V de la veine due à ce travail F sera tout aussi évidemment

$$V = \sqrt{\frac{2gF}{M}},$$

à la condition *sine qua non* qu'on puisse poser $P_x = P_r$.

Dans ce dernier cas, l'intégrale générale $\int P dW$ devient, en effet,

$$\int_{P_0}^{P_r} P dW = \int_{P_0}^{P_r} P_0 \left(\frac{W_0}{W}\right)^{\frac{c_p}{c_v}} dW,$$

et en remplaçant $P_0 W_0$ et $P_r W_r$ par les valeurs que nous donne aujourd'hui la Thermodynamique des gaz, on trouve aisément :

$$V = \sqrt{2gEc_p T_0 \left[1 - \left(\frac{P_r}{P_0}\right)^{1 - \frac{c_v}{c_p}} \right]},$$

c'est-à-dire l'équation bien connue de Weisbach.

En désignant par Y_1 le volume écoulé par unité de temps pris à la pres-

sion P_r et à la température de détente T_1 de la veine, et par S la section effective de l'orifice d'écoulement, on a :

$$Y_1 = S \sqrt{2gEc_p T_1 \left[1 - \left(\frac{P_r}{P_0} \right)^{1 - \frac{c_p}{c_p}} \right]}.$$

Il semble maintenant qu'en nous donnant une valeur convenable pour S , nous puissions faire que ce soit précisément aussi le volume spécifique W_r qui s'écoule par unité de temps. Rappelons-nous pourtant que la vitesse V , imprimée successivement à toutes les molécules de l'unité de poids de gaz, est due au travail mécanique F exécuté par l'unité de poids aussi, mais en un temps *quelconque, indéterminé*, dépendant d'une possibilité physique. Or, en posant

$$Y_1 = W_r,$$

nous admettons implicitement que le travail total F donne forcément, dans l'unité de temps, la vitesse V à *toutes* les molécules de la masse représentée par W_r . Or, ceci est une supposition tout à fait arbitraire. Un travail mécanique F , en effet, communique toujours nécessairement une même vitesse V à l'unité de masse; mais le temps qu'il faut pour cela dépend, non de la grandeur du travail, mais de l'intensité des forces en jeu qui produisent ce travail. Rien au monde ne nous autorise à dire que la détente

$$\int_{P_0}^{P_r} P dW = F_d,$$

et le travail

$$(P_0 W_0 - P_r W_r) = F_0$$

donneront toujours précisément, dans l'unité de temps, la vitesse V à toutes les molécules qui forment l'unité de masse. Si cela n'a pas lieu, il est évident qu'au sortir même de l'orifice d'écoulement, les molécules, en raison de leur inertie, ne *fuiront* plus assez rapidement, et ce retard occasionnera une contre-pression continue, de telle sorte qu'on ne pourra plus à aucun titre écrire $P_x = P_r$. — Si j'ai su m'exprimer clairement, je pense que chacun

sera frappé des considérations précédentes; elles peuvent seules conduire à la Théorie correcte de l'écoulement des gaz.

Il va maintenant m'être facile de montrer l'objection sérieuse qu'on peut faire, du moins à première vue, à la méthode que j'ai employée pour calculer les vitesses *maxima* du gaz à l'orifice d'écoulement. Elle est bien différente de celle que fait M. CLAUSIUS.

Si l'air, sans avoir pour cela une autre densité, était un corps relativement incompressible, comme l'eau, par exemple, on aurait pour l'expression de la vitesse d'écoulement

$$v = \left(\frac{Y}{S}\right),$$

Y étant le volume débité par unité de temps par le gazomètre et S étant la section effective de l'orifice. V est évidemment une vitesse *minima*. Le gaz, étant parfaitement élastique, doit se détendre, et il se détend en effet, pendant qu'il passe de la pression P_0 du réservoir de compression à la pression P_r du réservoir de raréfaction. Le volume spécifique W_0 est connu à la pression P_0 ; si nous connaissions aussi le volume spécifique W_x là où la veine possède la vitesse *maxima*, nous aurions rigoureusement :

$$v_x = \left(\frac{Y}{S}\right) \cdot \left(\frac{W_x}{W_0}\right).$$

Toutefois, pour pouvoir écrire, sous forme générale,

$$W_r = W_0 \left(\frac{P_0}{P_r}\right)^{\frac{c_v}{c_p}}, \dots \dots \dots (\Lambda)$$

il faudrait, non seulement que le gaz, pendant l'écoulement, ne reçût ni ne perdît de chaleur du dehors, ce qui est à la rigueur possible *approximativement*, mais il faudrait encore que là où la vitesse des molécules est à son *maximum* dans la veine, on eût :

$$P_x = P_r;$$

il faudrait, en un mot, que, quelle que soit la grandeur de la différence $(P_0 - P_r)$, cet excès de pression suffit pour donner à l'unité de masse de gaz l'accroissement de vitesse $V_x > V_0$. Or, si nous allons de suite à l'extrême,

si nous posons $P_r = 0$, ce qui nous donne :

$$W = W_0 \left(\frac{P_0}{0} \right)^{\frac{c_v}{c_p}} = \infty,$$

il est bien évident que cet accroissement est une impossibilité en Mécanique. Une force motrice finie ($P_0 - 0$) ne peut donner en un temps fini une vitesse infinie à l'unité de masse. Pour avoir une valeur correcte de V , il faudra écrire dans l'équation une pression $P_x > 0$, encore inconnue dans l'état actuel des choses. Ce qui est toutefois très clair, c'est que l'équation (Δ) donnera des résultats d'autant plus approximatifs que P_r deviendra plus grand par rapport à P_0 , et que, d'un autre côté, pour ramener à la réalité les résultats du calcul, il ne sera pas nécessaire de faire P_x *beaucoup* plus grand que P_r .

Pour bien me faire comprendre, je prends un exemple numérique. Supposons qu'ainsi que je l'ai trouvé dans beaucoup de mes expériences, la vitesse de l'air ait été de 200 mètres, le gaz étant considéré comme incompressible et étant pris à sa pression et à sa température au gazomètre. La pression dans le réservoir de raréfaction étant 0^m,010 (en mercure) et celle du réservoir de compression étant 0^m,760, cherchons quelle valeur il faut adjuger à P_x pour que la vitesse réelle du gaz s'élève à 970 mètres, c'est-à-dire seulement au double de la vitesse moléculaire normale dans l'air, d'après la Cinétique. Nous avons :

$$970 = 200 \left(\frac{0,760}{P_x} \right)^{\frac{1}{1,41}},$$

d'où nous tirons :

$$P_x = 0^m085.$$

Il faudrait donc admettre que dans un réservoir où la pression est de 0^m,010, la résistance due à l'inertie des molécules se traduit par une pression de 0^m,083 en colonne de mercure en aval de l'orifice et là où le gaz est devenu parfaitement libre de se mouvoir en toutes directions. Quelle importance qu'on donne à la cause que j'ai signalée et discutée dans ces pages, il n'est pourtant guère admissible que son action s'élève aussi haut. — On dira sans doute que la loi de Weisbach, qui, en apparence, repose

implicitement sur la Théorie dynamique, donne une limite de vitesse inférieure (735 mètres), même en y écrivant $P_r = 0$. Mais, comme je l'ai dit longuement dans mon Mémoire aux *Annales de Chimie et de Physique*, cette loi, pour des différences très grandes entre P_0 et P_r , est absolument inexacte, sans qu'il soit possible pour le moment de dire les raisons de cette défectuosité. Les résultats auxquels elle mènerait seraient visiblement encore plus faux, si, au lieu de notre pression observée $0^m,010$, nous écrivions pour P_r la valeur que nous venons de trouver, par exemple, pour le cas particulier $P_0 = 0^m,760$ et $P_x = 0^m,083$.

Quoi qu'il en soit, si j'ai su m'énoncer clairement, on reconnaîtra maintenant quel est le côté réellement défectueux de ma méthode d'évaluation des vitesses. Cette méthode n'est point *fictive*; en l'appliquant je n'ai fait que suivre les principes qui avaient guidé jusqu'ici la plupart des Analystes, dans l'étude des lois d'écoulement des gaz, principes qui doivent être modifiés par les raisons que j'ai données. Mais cette méthode conduit tout au moins à une approximation, et quelque diminution qu'on veuille faire subir, un peu arbitrairement d'ailleurs, aux nombres qu'elle donne pour la vitesse d'un gaz s'écoulant dans le vide, ces nombres sont, en toute hypothèse, inexplicables en Cinétique.

§ VIII.

Critique de la Théorie cinétique tirée de l'étude de l'écoulement des gaz.

Après avoir montré que les erreurs, les conclusions erronées, les fautes graves de tous genres, etc., qui, sans aucun voile sur les termes, me sont si généreusement imputées par mon critique, n'ont aucune existence réelle ou sont d'une tout autre nature et tournent, au contraire, contre la Cinétique, je passe à d'autres objections, dont une partie, tout au moins, saute aux yeux et eût dû depuis longtemps frapper les Physiciens.

Je précise d'abord très nettement les faits sur lesquels j'appelle l'attention du lecteur.

Soit (pl. II, fig. 1) un cylindre (A), muni d'un piston sans frottement, et

rempli d'un gaz, d'air atmosphérique sec, par exemple, à une pression P_0 . Soit (B) un espace indéfiniment étendu et vide, ou du moins ne renfermant que le gaz à un état de raréfaction telle qu'on puisse considérer sa pression comme négligeable par rapport à P_0 .

A l'aide d'un robinet que nous entr'ouvrons, mettons (A) en rapport avec (B) et :

1^{re} EXPÉRIENCE, faisons avancer le piston de telle sorte que la pression reste *constante* en (A), pendant l'écoulement ;

2^{me} EXPÉRIENCE, laissons le piston immobile, pendant que, par suite de son élasticité propre, le gaz s'écoule de (A) en (B).

Dans le premier cas, *la température restera absolument constante en (A)* ; dans le second cas, et si nous supposons les parois du cylindre imperméables au calorique, *la température, au contraire, baissera en (A)*, jusqu'à ce que le gaz soit complètement écoulé, c'est-à-dire jusqu'à ce que la pression en (A) soit devenue égale à celle de (B), si faible qu'elle soit.

Ces deux faits élémentaires de la Théorie générale des gaz sont si connus que je fais sans doute sourire le lecteur en les lui rappelant. Il va cependant m'être facile de prouver que, dans une *espèce spéciale de Cinétique* tout au moins, ils seraient impossibles et que :

Objection IV.

Le gaz devrait *s'échauffer continuellement en (A)*, dans la première expérience ;

Objection V.

Le gaz ne devrait *nullement changer de température*, dans la seconde expérience.

Ces deux assertions, présentées comme conséquences de la Théorie cinétique, semblent *monstrueuses* ; et elles le sont, en effet. J'ai dit : *dans une espèce*

spéciale de Cinétique. Je définirai bientôt cette espèce. Je m'étends d'abord sur deux autres faits aussi connus, aussi élémentaires que les deux précédents.

Si, sans laisser le gaz s'écouler, nous le refoulons, à l'aide du piston, dans le cylindre (A) à parois *imperméables au calorique*, il s'échauffe en même temps que la pression s'accroît. La quantité de chaleur représentée par l'élévation de température est toujours proportionnelle au travail dépensé pour le refoulement du piston. Si, pendant l'opération, nous soustrayons de la chaleur, de façon à tenir la température constante, la quantité soustraite reste encore proportionnelle au travail dépensé, qui, toutefois, est alors moindre, pour une même réduction du volume.

Si, sous l'action de l'élasticité du gaz, nous laissons le piston reculer lentement, la température baisse et la quantité de chaleur que représente cet abaissement est proportionnelle au travail mécanique, cette fois produit par le mouvement du piston.

Nous disons que, dans ces divers cas, la quantité de chaleur apparue ou disparue est proportionnelle au travail externe dépensé ou recueilli. Sur ce fait, pur et simple, et nullement hypothétique, comme on l'a prétendu parfois, repose une magnifique branche de la Physique moderne, la Thermodynamique des gaz. Mais, je le répète, c'est l'énoncé d'un fait et rien de plus.

Comment se produit le travail mécanique, dépensé ou recueilli? Quelle est l'origine de la chaleur apparue ou disparue parallèlement?

Dans la Théorie dynamique, nous disons qu'à tout travail mécanique produit ou consommé, qu'à tout mouvement communiqué ou soustrait à une masse de matière, correspond nécessairement une diminution ou une augmentation proportionnelle dans l'intensité de la Force qui détermine le phénomène; que si cette Force est l'électricité ou la chaleur, il faut de toute nécessité que la *quantité* en action de l'une ou de l'autre diminue ou s'accroisse. Cette manière de s'exprimer est, je me hâte de le dire, non une explication, mais l'énoncé d'un grand principe aujourd'hui en dehors de toute contestation possible.

La Théorie cinétique va plus loin; elle *explique* les faits d'une façon en quelque sorte palpable, et c'est indubitablement par cette raison qu'elle a séduit tant de bons esprits. Voyons comment, au cas particulier que nous examinons, elle explique les faits.

La pression d'un gaz, en Cinétique, est due aux chocs incessants d'une multitude de molécules, indépendantes entre elles, parfaitement élastiques (autrement elles finiraient par s'arrêter) et se heurtant d'ailleurs entre elles comme elles heurtent les parois de notre cylindre, comme elles heurtent le piston. Si celui-ci avance ou recule sous l'action de cette pression, il est évident qu'il y aura une dépense ou une production de travail mécanique; mais ce simple énoncé n'expliquerait encore en aucune façon *pourquoi* le gaz s'échauffe ou se refroidit, *pourquoi* sa vitesse moléculaire normale croît ou diminue. Cet énoncé serait, sous cette forme, un terme vide de sens.

Au lieu de milliards de molécules qui se croisent et se heurtent dans notre cylindre, commençons par n'y mettre qu'une seule bille parfaitement élastique, animée à l'origine de la vitesse U_0 ; supposons les parois parfaitement rigides (*imperméables à la chaleur*); supposons de plus qu'à chaque choc de la bille contre le piston, et seulement pendant la durée extrêmement courte du choc, ce piston avance avec une vitesse constante V . Soit θ_0 l'angle d'incidence au premier choc. Nous aurons pour la vitesse U_1 de réflexion :

$$U_1^2 = U_0^2 \cos^2 \theta_0 + (U_0 \sin \theta_0 + 2V)^2 = U_0^2 + 4VU_0 \sin \theta_0 + 4V^2;$$

après le second choc, nous aurons

$$U_2^2 = U_1^2 + 4VU_1 \sin \theta_1 + 4V^2;$$

et, généralement, pour la vitesse U_m après $(m - 1)$ chocs, nous aurons :

$$U_m^2 = U_{(m-1)}^2 + 4VU_{(m-1)} \sin \theta_{(m-1)} + 4V^2.$$

En partant de la loi habituelle d'élasticité de nos ressorts, il est aisé de s'assurer que, quelles que soient les vitesses V et U , la *durée* des percussions est la même et que le chemin très petit parcouru *pendant* la percusion croît comme $(U + V)$. Il suit de là que si nous faisons V plus ou moins grand, l'accroissement total sera toujours le même pour un même chemin parcouru par le piston, dans les conditions que nous avons précisées, puisque le nombre des percussions croît à l'inverse de V .

Quoi qu'il en soit, il est évident maintenant que c'est le *mouvement, petit ou grand d'ailleurs*, du piston qui est la cause, et la cause *unique*, de l'accroissement de vitesse de notre bille. Si, à cette bille unique, nous substituons des

milliards de molécules, se heurtant ou se croisant dans toutes les directions imaginables, il n'y aura absolument rien de changé au raisonnement précédent. La marche de notre piston, au lieu d'être saccadée, deviendra continue désormais, puisque les percussions, au lieu d'être espacées entre elles, seront continues aussi ; mais ce sera toujours le *mouvement* du piston qui fera croître ou du moins tendra à faire croître la vitesse U et, par conséquent, la température. Il se présentera deux cas bien distincts et bien connus en Thermodynamique. Si les parois du cylindre sont imperméables au calorique, U croîtra effectivement et la dépense d'action du piston croîtra par deux raisons : 1° Par la réduction du volume du gaz, non seulement le nombre de molécules par unité de volume et la pression s'accroissent tout naturellement ; 2° mais la vitesse U allant elle-même en croissant constamment, l'intensité de chaque percussion et, par conséquent, la pression due à la valeur de cette intensité croîtront par cette seconde raison. Si, au contraire, nous soustrayons de la chaleur de façon à maintenir constante la vitesse U et par suite la température T , la pression ne croîtra qu'en raison de l'accroissement du nombre de molécules par unité de volume et la quantité d'action mécanique dépensée pour une même réduction de volume sera moindre que dans le cas précédent.

L'explication que nous venons de donner s'applique mot pour mot au cas où le piston, au lieu d'avancer, recule. Avec notre bille unique, nous avons alors, pour la vitesse de réflexion après une percussion quelconque,

$$U_m^2 = U_{(m-1)}^2 - 4VU_{(m-1)}\sin\theta_{(m-1)} + 4V^2.$$

Il en sera de même pour des milliards de molécules ; la vitesse moléculaire, la température, diminuera ou tendra à diminuer, en raison et uniquement en raison du mouvement du piston, qui graduellement se soustrait ou tend à se soustraire aux molécules.

Mais ce qui demeure évident maintenant, c'est que, dans quelque condition que nous placions le gaz, l'action du piston subsistera. La vitesse moléculaire croîtra ou tendra à croître, si le piston avance ; cette vitesse diminuera ou tendra à diminuer, si le piston recule. Cette vitesse, au contraire, restera constante, si le piston est immobile.

Voyons les conséquences qui découlent de là.

Supposons d'abord les atomes gazeux, simples, infiniment petits (ceci a été

admis par quelques Philosophes); concédons-leur encore une élasticité parfaite, bien que ceci soit désormais absurde dans les termes mêmes, puisque le mot seul d'élasticité implique un changement de forme et que d'un autre côté un point infinitésimal est dénué de forme. Le nombre d'atomes contenus dans notre cylindre (A) étant fini, les intervalles interatomiques seront relativement infiniment grands; les chances de collisions interatomiques seront réduites, par conséquent, à un infiniment petit. Les seuls chocs possibles désormais concerneront les parois et le piston. Je viens de définir la Cinétique particulière à laquelle je faisais allusion plus haut. Elle a, je le répète, ses partisans aussi.

Ouvrons le robinet de communication de (A) avec l'espace *relativement* vide (B), et faisons avancer le piston de façon à maintenir la pression P constante. Que va-t-il se passer? — Les premiers atomes que la *chance* amènera dans la direction de la partie dénudée des parois, de l'ouverture, s'échapperont avec leur vitesse initiale U_0 , cela est évident. Mais à partir de ce début, tous les atomes restants iront heurter le piston *en mouvement*, et ils le heurteront d'autant plus souvent que la chance les fera résider plus longtemps dans le cylindre (A). La vitesse atomique ira donc continuellement en croissant pour tous les atomes qui demeurent encore présents en (A); et c'est avec ces vitesses continuellement croissantes qu'ils s'échapperont successivement par l'ouverture. La température d'un gaz ainsi constitué irait donc bien positivement en croissant pendant l'écoulement sous pression constante.

Au lieu de faire avancer le piston, laissons-le immobile. Que se passera-t-il dès lors? — La vitesse atomique initiale U_0 restera absolument inaltérée et tous les atomes successivement s'échapperont avec cette même vitesse. — La température d'un gaz ainsi constitué restera donc constante en (A) pendant l'écoulement.

On sait que les deux faits *forcés* auxquels nous venons d'aboutir n'existent point. La Cinétique particulière que j'ai spécifiée est donc à rejeter une fois pour toutes.

A cette Théorie cinétique, substituons celle qui est beaucoup plus généralement admise : molécules très petites, indépendantes entre elles, séparées par des intervalles moyens très grands, animées d'une vitesse moyenne U_m , se heurtant entre elles de toutes les façons possibles.

Qu'y aura-t-il de changé aux phénomènes, par suite de cette substitution ? — Les molécules, cela est évident, ne frapperont plus toutes successivement le piston ; mais il y en aura par conséquent qui le frapperont beaucoup plus souvent : ce sont celles-ci qui recevront du piston la part d'accroissement de vitesse qu'eussent prise les autres et qui à leur tour la transmettront à ces autres. A ce point de vue, il n'y aura donc déjà rien de changé à la forme du phénomène. — La température *tendra* donc à s'élever comme tout à l'heure, pendant l'écoulement à pression constante. Si elle ne s'élève pas réellement, ce ne pourrait être que parce que les vitesses très petites à chaque instant gagnées par les molécules, heurtant le piston, se communiqueraient au fur et à mesure aux molécules qui s'échappent par l'orifice. On pourra expliquer cette communication algébriquement, c'est-à-dire l'admettre *a priori* et la traduire en symboles et puis en nombre ; mais on aura quelque peine à expliquer physiquement et mécaniquement comment les molécules, en nombre immense, qui se trouvent en (A) pourraient continuellement se débarrasser, en faveur de celles qui se trouvent par hasard à l'orifice, de la vitesse à chaque instant acquise par suite du mouvement du piston. D'ailleurs pour recourir à cette explication, il faut complètement perdre de vue ce qui se passe en réalité, il faudrait oublier que près de l'ouverture, il se produit, au contraire, un refroidissement, une détente due à l'élasticité du gaz, cause réelle et unique du phénomène du mouvement et de l'écoulement des fluides gazeux.

Si, au lieu de faire avancer le piston pendant l'écoulement, nous le laissons immobile, les résultats seront évidents, au point de vue de la Cinétique particulière dont j'ai parlé. Mais seront-ils autres si nous partons de la Cinétique ordinaire ? — Pas plus pour celle-ci que pour celle-là, il n'existe de raison possible pour que le mouvement moléculaire en (A) se ralentisse, par ce seul fait que certaines molécules, au lieu de heurter les parois, trouvent une partie dénudée par laquelle elles peuvent librement s'échapper en ligne droite. En d'autres termes, un refroidissement quelconque est impossible dans l'une de ces Cinétiques comme dans l'autre.

L'abaissement de la température, pour un gaz qui s'écoule dans le vide, ou dans un espace où la pression est moindre, est un fait élémentaire. Et la Cinétique ne l'explique pas. Loin de là, elle mène à des résultats précisément opposés.

Tout l'ensemble des résultats auxquels nous venons d'arriver repose sur cette considération évidente de vérité, mais fondamentale : c'est qu'en vertu de la préexistence du mouvement moléculaire, dans un gaz constitué cinétiquement, les phénomènes physiques et mécaniques internes d'une masse gazeuse sont très différents, selon que le gaz pousse en avant un piston lui faisant sans cesse équilibre en pression, ou qu'il s'écoule simplement d'un vase à l'autre, par suite d'une différence de pression. Dans le premier cas seul, il s'effectue un travail réel aux dépens du mouvement moléculaire ; dans le second cas, le gaz ne peut que garder sans altération ce qu'il possède déjà. — Il en est tout autrement en Théorie dynamique ; ici il y a identité absolue, que le gaz pousse un piston, ou qu'en vertu de son élasticité il *pousse* en avant ses propres molécules. — On ne saurait trop insister sur cette différence, qui semble avoir échappé à tous les Cinétistes.

Objection VI

tirée de l'analyse d'une Expérience bien connue de M. JOULE.

Examinons, au point de vue où nous nous sommes placés, l'expérience classique et justement mémorable de M. JOULE.

Dans un réservoir (A) (pl. II, fig. 2), de l'air sec se trouve comprimé à une pression P_0 ; dans un réservoir (B), le vide est fait aussi complètement que possible. Les deux réservoirs sont mis en communication. Lorsque les pressions se sont égalisées de part et d'autre, on constate que l'air en (A) s'est *refroidi*, que l'air en (B) s'est *échauffé*, et que les deux phénomènes se balancent de telle sorte que la quantité de chaleur présente dans la masse totale de gaz est restée invariable.

Les équations de la Thermodynamique nous permettent de traduire ces phénomènes jusque dans leurs moindres détails. Ces équations ont été construites en dehors de toute hypothèse particulière, et à l'aide seulement de quelques propriétés élémentaires des gaz très éloignés de leur point de liquéfaction, c'est-à-dire de gaz tels que l'air, l'hydrogène, dans lesquels l'attraction moléculaire est très faible et où, par conséquent, le travail interne qui s'opère pendant les changements de volume est négligeable.

En Cinétique aussi, si nous nous contentons d'une traduction algébrique, nous exprimons aisément les phénomènes principaux. En désignant par U_i la vitesse moléculaire initiale en (A), par U_a la vitesse moléculaire en (A) après l'écoulement du gaz, et par U_b cette vitesse en (B), la masse totale de gaz étant M , et la masse restant en (A) étant m , il vient, en effet, forcément :

$$MU_i^2 = (M - m)U_a^2 + mU_b^2.$$

Mais ceci est de l'Algèbre toute pure. Algébriquement, nous pouvons transvaser les vitesses moléculaires comme il nous plaît, les faire passer de telle catégorie de molécules sur telle autre. Pourvu que nous nous conformions au principe de la conservation des forces vives, nous aboutirons toujours à des résultats numériquement corrects. — Mais la question essentielle ici est de savoir si de tels transports de vitesses se réalisent mécaniquement, ou plutôt physiquement. Si nous nous posons cette question dans l'examen de l'expérience de M. JOULE, nous reconnaissons promptement que dans l'interprétation cinétique des phénomènes nous aboutissons à des impossibilités physiques absolues. Considérons, en effet, deux périodes seulement de l'expérience : 1° le moment de l'ouverture de la communication de (A) avec (B); 2° et le moment de la fermeture de cette communication.

1° Au moment de l'ouverture, les molécules ne passent en (B) que par cette raison unique : qu'au lieu de rencontrer partout un obstacle qui les force à rebrousser chemin, elles rencontrent une surface *dénudée*; elles traversent donc celle-ci avec leur vitesse intégrale primitive U_i ; il n'y a aucune raison imaginable pour qu'elles accélèrent ou ralentissent. Celles qui restent en (A), ne cédant ou ne recevant rien, ne peuvent non plus varier de vitesse. Pendant le premier instant, si court qu'on voudra, mais *non infiniment petit*, le refroidissement est donc en toute hypothèse nul en (A). Et il n'y a aucune raison plausible pour qu'il en soit autrement dans les instants suivants.

2° Admettons-le cependant, admettons qu'au moment où les pressions en (A) et en (B) vont être égales, la température en (A) soit tombée à $T_f < T_i$, et qu'en (B), au contraire, elle se soit élevée à $T_g > T_i$. Dans ce moment, la vitesse moléculaire en (A) sera donc U_f , et la vitesse moléculaire en (B) sera $U_g < U_f$. C'est avec la vitesse U_f que les dernières molécules pénétreront

en (B), pour rétablir complètement l'égalité des pressions. — Est-il maintenant soutenable un seul instant, *physiquement parlant*, que des molécules animées de la vitesse U_f , non seulement contribuent à accroître encore un tant soit peu la vitesse de celles qui sont déjà en (B), mais que, par cet acte, leur propre vitesse puisse encore s'accroître?

On dira peut-être que puisque la densité du gaz en (A) est plus grande qu'en (B), en raison même de l'abaissement de la température, le nombre de percussions, à égalité de pression, est plus grand par là et compense la réduction qu'a subie la vitesse moléculaire U , de sorte que la plus légère différence entre les pressions en (A) et en (B) peut déterminer un accroissement de la vitesse en (B). Ceci toutefois serait une bien grave erreur. Dans la Cinétique, l'intensité de la pression a deux facteurs bien distincts :

- 1° Le nombre de battements par unité de surface qui résulte de la valeur de la densité du gaz ;
- 2° Et la vitesse U au moment de la percussion.

Or, si grande que soit la partie de P qui relève du nombre des battements par unité de surface, jamais ce facteur de la pression ne pourra modifier l'autre. Quand des milliers de molécules animées d'une vitesse U_a frapperaient une seule molécule animée de la vitesse $U_b > U_a$, elles ne pourraient faire grandir U_b aux dépens de U_a . Cela n'est physiquement pas plus possible qu'il ne l'est que la chaleur passe spontanément d'un corps sur un autre *plus chaud*. Il ne s'agit pas ici d'une simple comparaison; *en Cinétique c'est une identité*. Si l'on suppose une surface métallique, par exemple, à une température T_0 telle que la vitesse moléculaire de vibration soit U_0 , on aura beau comprimer le gaz en contact avec cette surface, ses molécules animées de la vitesse $U_1 > U_0$ recevront de la plaque la vitesse U_0 et ne pourront jamais leur donner une partie de leur propre vitesse U_1 de façon à faire encore croître U_0 . Il ne saurait en être autrement, si, à la plaque solide ou liquide, nous substituons les molécules d'un gaz.

Je ne crains point de le dire bien haut, l'application de la Théorie cinétique des gaz à l'interprétation de la magnifique expérience de M. JOULE conduit à une sorte d'hérésie en Mécanique élémentaire.

§ IX.

Suite de la réfutation de la Théorie cinétique.*Objection VII*

tirée de la constance de la vitesse de propagation du son dans les gaz.

Dans un gaz formé de particules disjointes et indépendantes les unes des autres, qu'elles soient d'ailleurs en repos et également distribuées dans l'espace, ou qu'elles soient animées de tous les mouvements imaginables, mais de grandeur finie, la vitesse de propagation des ondes sonores est nécessairement une fonction de l'intensité du son.

Cet énoncé a un caractère tellement élémentaire d'évidence qu'il semblerait presque inutile de nous y arrêter. Cependant, comme aucun défenseur de la Théorie cinétique ne s'en est jamais préoccupé, je vais essayer de le démontrer sous la forme la plus élémentaire et la plus concise possible. Je recourrai pour cela à l'expérience qu'on montre aux élèves dans les cours les plus rudimentaires.

Concevons (pl. II, fig. 3) une suite indéfinie de billes d'ivoire A, B, C, D, ... Z, suspendues sur une même ligne horizontale à des fils très longs, très déliés et sans poids (relativement). Après avoir soulevé la bille A, comme l'indique la figure, laissons-la retomber dans le plan vertical de la rangée de fils. Que va-t-il se passer? — Au moment où A touchera B, Z se mettra en mouvement et s'élèvera à une hauteur qui serait exactement égale à celle d'où est tombé A, si l'élasticité des billes d'ivoire pouvait être parfaite et si d'ailleurs il n'existait pas d'autres causes assez multiples de perte de vitesse. Toutes les autres billes, y comprise A, restent immobiles après le choc, jusqu'au retour de Z; et alors le même phénomène recommence en sens inverse; c'est A qui remonte et Z qui s'arrête, etc., etc. J'ai dit: Au moment où..... Ceci n'est pas rigoureux. Par le choc de A toutes les billes successivement, à commencer par A et par B, se déforment. En se déformant et en se *reformant*, B, par exemple, résiste au mouvement de A et pousse en avant C; mais C n'étant pas libre, déforme à son tour D en revenant à sa forme pre-

mière, etc., etc. Le temps qu'il faut à cette suite de compressions et de *décompressions* pour se propager de B en Y n'est pas nul, il s'en faut ; il est seulement très court, imperceptible à nos sens. Il dépend de l'*espèce* de billes, c'est-à-dire du degré d'élasticité.

Procédons autrement. Au lieu de mettre les billes en contact comme primitivement, séparons-les (fig. 4), rendons-les indépendantes les unes des autres et recommençons l'expérience. Les choses vont se passer bien différemment. Au moment de la percussion, A s'arrêtera, B partira pour frapper C et s'arrêter à son tour ; ainsi de suite, jusqu'à Z, qui s'élèvera comme précédemment. Le temps qu'il faudra maintenant au mouvement de A pour arriver à Z se composera évidemment de celui qu'il a fallu dans la première expérience pour comprimer et *décompresser* les billes, plus la somme des temps qu'il faut aux billes pour parcourir l'espace qui les sépare. Or, tandis que le premier de ces temps dépend surtout de l'élasticité des billes, la seconde durée, au contraire, dépend directement de la vitesse de percussion de A, cela est évident. Tandis que le premier est très court, la seconde durée, si les espaces de séparation des billes sont très grands par rapport à leur diamètre, devient très sensible et tellement prédominante, que nous pourrions négliger complètement le premier. Or c'est ce qui aurait précisément lieu quant à un gaz *constitué cinétiquement* ; on est obligé de regarder les diamètres des atomes comme infiniment petits par rapport aux intervalles qui les séparent, si petits qu'ils soient eux-mêmes.

Il suit évidemment de là que le temps que mettra le mouvement à se propager de A en Z par chocs successifs sera le même que celui que mettra A à aller en ligne droite jusqu'à Z et qu'il ne dépendra absolument que de la vitesse d'impulsion de A.

A nos billes rangées en ligne et en repos, nous pouvons substituer maintenant des milliards de billes en mouvement et limitées dans un certain espace donné. Il n'y aura absolument rien de changé *au mécanisme* du phénomène précédent. Une quelconque d'entre elles, ou des milliers à la fois ou successivement, étant frappées, par exemple, par une corde de violon en état de vibration, la vitesse nouvelle que prendra chacune d'elles par la percussion dépendra évidemment, et entre autres, de la vitesse de la corde

même, c'est-à-dire de l'intensité de la note musicale. Le temps qu'il faudra au mouvement pour se propager par chocs successifs d'un point à l'autre de l'espace, pour se propager du corps vibrant à notre oreille, dépendra tout aussi évidemment de l'intensité du choc primitif. La vitesse du son ne sera autre que la vitesse des molécules frappées par la corde.

Ainsi donc, comme je l'ai dit, dans un milieu formé d'atomes disjoints et indépendants les uns des autres, la vitesse de propagation dépend de l'intensité du son : ce qui est absolument contraire aux faits réels.

Bien des Physiciens ont essayé de soutenir que la vitesse du son dépend en effet de l'intensité de l'impulsion. J'ai écrit à ce sujet à l'ACADÉMIE ROYALE DE BELGIQUE une Lettre, qu'elle a bien voulu admettre dans ses *Bulletins* ¹. Ici je rappellerai seulement que les expériences si précises de REGNAULT, tout en nous apprenant que la vitesse des ondes sonores croît avec l'intensité des vibrations, ont montré aussi que cet accroissement est très petit. En partant de ces expériences, nous n'avons pas à modifier quoi que ce soit à l'ensemble de ce paragraphe.

Je ne veux pas quitter ce sujet sans faire remarquer qu'il n'est pas plus possible de constituer les ondes lumineuses, les ondes calorifiques que les ondes sonores avec un milieu formé de parties disjointes. Pour les unes et pour les autres, tous les Analystes, sans aucune exception, ont toujours admis implicitement que le milieu auquel ils recourent dans leurs équations est formé de parties continuellement solidaires entre elles jusque dans leurs subdivisions infinitésimales. Et toutes les fois que les défenseurs de la Théorie vibratoire de l'Univers soumettent les phénomènes à l'analyse, ils admettent sans le dire, et peut-être sans s'en douter, la non-disjonction, l'interposition d'un ÉLÉMENT DYNAMIQUE, entre les subdivisions de la Matière prétendue unique et universelle qu'ils font vibrer. On ne saurait signaler assez haut ce qu'il y a de contradictoire, et de contraire à toute saine logique, à procéder ainsi.

¹ RÉFLEXIONS SUR LA CONSTANCE DE LA VITESSE DE PROPAGATION DU SON DANS UN MILIEU GAZEUX ; Lettre de M. G.-A. HIRN, Associé de la Classe des Sciences, à M. le Lieutenant-Général LIAGRE, Secrétaire perpétuel de l'Académie royale de Belgique, parue aux *Bulletins*, 3^{me} série, t. XI, n° 3; 1886.

§ X.

Suite de la réfutation de la Théorie cinétique.*Objection VIII**tirée de l'étude de la hauteur de notre Atmosphère.*

En partant de la Théorie cinétique, on reconnaît aisément que dans la constitution de notre Atmosphère terrestre, il existerait une relation directe entre la vitesse normale des particules de l'air à la surface de la Terre et à une température donnée, et la hauteur de cette Atmosphère.

Supposons un cylindre vertical, à parois imperméables à la chaleur, ouvert par le haut, fermé par le bas, ayant juste la hauteur de l'Atmosphère au point où nous nous trouvons, rempli d'air sec dont la température à la base soit zéro degré centigrade. La vitesse des molécules de l'air à cette température est, comme on sait, d'après la Cinétique, de 485 mètres à la seconde.

Cette vitesse est précisément celle que prendrait une molécule en tombant dans le vide d'une hauteur égale à celle de l'Atmosphère, ou pour parler plus correctement, la hauteur de notre cylindre ou de l'Atmosphère serait celle qui serait nécessaire pour donner la vitesse de 485 mètres à une molécule tombant dans le vide.

Et cela demeure vrai, quelque petit qu'on suppose le chemin parcouru par chaque molécule entre les chocs réciproques, quelle que soit la loi d'élasticité qu'on adjuge à la molécule, quelles que soient les dimensions et les formes qu'on leur adjuge aussi, pourvu qu'on admette toujours que les molécules sont parfaitement *indépendantes entre elles* dès que leur contact a cessé.

Ce que nous disons de la couche atmosphérique inférieure demeure vrai pour toutes les couches horizontales possibles à mesure que nous nous élevons dans le cylindre. En chacune de ces couches, la vitesse sera moindre et toujours égale à celle que produirait la chute dans le vide depuis la limite de l'Atmosphère à la couche considérée. La vitesse des molécules, la température, la densité, la pression iront, en un mot, en diminuant et cela suivant une loi qu'il est bien facile d'établir analytiquement.

En supprimant maintenant notre cylindre idéal, il est évident que nous compliquons le phénomène, nous y introduisons le désordre, puisque aux mouvements moléculaires représentant la température de l'air et produisant la pression en chaque point, nous en ajoutons d'accidentels des plus variés dus à l'action du Soleil et au mouvement de la Terre elle-même : mais nous ne changeons rien du tout au fond des choses. La hauteur en chaque point de la surface terrestre sera toujours celle qui serait capable de produire la vitesse des molécules répondant à la température et à la hauteur de la couche que nous considérons. Je crois m'être assez étendu sur cette question (AVENIR DU DYNAMISME, pages 45 ≡ 48) ¹ pour n'avoir pas à en répéter la démonstration.

La vitesse de 485 mètres répondant à très peu près à une chute de 12000 mètres, telle serait donc la hauteur d'une Atmosphère parfaitement calme, soustraite à toute action perturbatrice et supposée à zéro, à la surface de la Terre. Les causes continues de trouble qui interviennent sans cesse modifient certainement ce nombre, mais non considérablement. Cette modification allât-elle de 1 à 2, ce qui n'est pas un instant admissible, nous n'aurions encore qu'une hauteur (24000 m.) bien éloignée de la réalité. — Ce qui est évident aussi, c'est qu'à la limite de l'Atmosphère, la vitesse propre des molécules est forcément nulle en Cinétique. Cette couche-limite serait donc au zéro absolu, ce qui est tout aussi certainement faux.

§ XI.

Suite et fin de la réfutation de la Théorie cinétique.

Objection IX

tirée de l'analyse de certains phénomènes chimiques.

Je passe à un genre d'objections que j'appellerai secondaires, parce qu'elles sont tirées d'une Science différente de la Physique et de la Méca-

¹ Voyez aussi pages 183-186 de mon Mémoire déjà cité : RECHERCHES EXPÉRIMENTALES ET ANALYTIQUES SUR LES LOIS DE L'ÉCOULEMENT ET DU CHOC DES GAZ EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE.

nique, mais qui n'en gardent pas moins une grande valeur, lorsqu'on se met en dehors et au-dessus des démarcations si nettes et si raides qu'on s'est plu à établir entre nos diverses Sciences naturelles.

On connaît aujourd'hui en Chimie une foule de combinaisons dont l'équilibre est des plus instables et qui se décomposent instantanément par suite du plus léger trouble mécanique qu'on leur fait éprouver. Le fulminate d'argent, l'iodure d'azote, sont en quelque sorte *intactiles*. Est-il un seul instant admissible que ces corps puissent recevoir continuellement les chocs des molécules de l'air animées d'une vitesse de 485 mètres au moins et les faire rebondir avec la même vitesse sans se décomposer? — On dira sans doute que c'est, non une masse d'air appréciable, mais que ce sont les molécules isolément, c'est-à-dire en quelque sorte des masses infiniment petites, qui frappent ainsi le corps explosif. Mais ceci est un raisonnement fautif, car ce sont aussi les molécules, prises isolément, du corps explosif, qui sont frappées, et le rapport relatif des masses subsiste; la décomposition d'une seule molécule suffirait certainement pour amener celle de toutes les voisines. Lorsque, par exemple, une étincelle électrique traverse un mélange d'oxygène et d'hydrogène, la combinaison des deux gaz s'opère à la fois sur toute l'étendue du trajet de l'étincelle, chaque molécule de vapeur d'eau se formant sans la coopération des voisines, et l'inflammation se propage ensuite de proche en proche avec une rapidité excessive (BERTHELOT) d'atomes à atomes d'abord mêlés.

Si des corps explosifs, solides ou liquides, frappés par les molécules de l'air, nous passons à certains corps gazeux explosifs aussi, et à un haut degré, la difficulté croît encore, pour expliquer la conservation de ces corps. L'une des combinaisons du chlore et de l'oxygène se décompose, comme on sait, au moindre changement de pression. Ce corps, étant gazeux, doit ses propriétés physiques aux mouvements propres de ses molécules, absolument comme l'air et les autres gaz constitués, par hypothèse, cinétiquement. Ses molécules, en un mot, se heurtent continuellement les unes contre les autres ou contre les parois des réservoirs, avec une vitesse considérable. Comment de telles combinaisons peuvent-elles, non pas seulement subsister, mais même se produire? — Une autre objection d'ailleurs se présente d'elle-même à

l'esprit. Mes critiques m'ont reproché de simplifier trop arbitrairement la Cinétique des gaz; je me permettrai donc de faire à mon tour un peu de désordre. La vitesse moyenne des molécules de l'air à zéro est de 485 mètres; mais par suite de la confusion des chocs, il peut et il doit, je l'ai déjà dit, se produire des cas isolés tels qu'une des molécules arrive pendant un instant très court au repos absolu, tandis que d'autres prennent des vitesses colossales; il peut et il doit aussi arriver que telle molécule, au lieu d'acquérir par les chocs une plus grande vitesse de translation, reçoive au contraire une vitesse de rotation sur elle-même, autour de son centre de gravité. La sphéricité de l'atome simple ayant disparu par la combinaison chimique avec d'autres atomes, ce cas de rotation devient aussi possible, aussi probable que celui du mouvement de translation accru par des chocs irréguliers. Si nous supposons que par les chances des chocs, une molécule d'oxyde de chlore arrive à une vitesse circonférentielle de 500 mètres, et si nous concédons à cette molécule le rayon *certainement exagéré* de 0^m,000001 entre les centres de gravité des atomes simples, nous arrivons, pour la valeur de la force centrifuge tendant à rompre la combinaison, à l'énorme nombre :

$$g = 9,80896 \cdot \frac{500^2}{0,000001} = 9,80896 \times 250000000000.$$

C'est à cette force que devrait sans cesse faire équilibre l'attraction chimique, pour prévenir la décomposition de la molécule prise isolément, décomposition qui amènerait infailliblement celle de toute la masse de gaz, quel que soit l'état de mouvement des autres molécules !

La force des remarques précédentes tombe en quelque sorte sous le sens. Je ne me fais pourtant pas la moindre illusion à ce sujet. Les Chimistes continueront encore longtemps à construire leurs molécules si compliquées et si ingénieuses, sans se préoccuper de leurs voisins les Cinétistes; et ceux-ci, de leur côté, continueront pendant longtemps aussi à tourmenter ces molécules si fragiles, sans s'inquiéter le moins du monde de leur instabilité.

§ XII.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

Définition et caractère particulier de la Doctrine dynamique.

Substitution définitive
de cette Doctrine aux Théories vibratoires de l'Univers.

Nous voyons que la Théorie cinétique des gaz, en d'autres termes, que la Théorie qui prétend faire dériver toutes les propriétés de ces corps de simples mouvements de leurs molécules, doit être définitivement rejetée. Si, sur les neuf objections capitales que nous venons de voir s'élever contre elle, une seule est valable, la Théorie devient déjà insoutenable ; mais elles sont toutes valables ; les trois d'entre elles qui ont été attaquées par M. CLAUSIUS et déclarées erronées ont, je ne crains point de le dire, gagné en force par la critique de mon illustre adversaire. — Je dis : « Si une seule » Une d'entre elles tout au moins eût dû, depuis très longtemps, frapper les Physiciens, c'est celle qui est relative à la constance de la vitesse de propagation du son. Si je la cite encore une fois, ce n'est pas parce qu'à mon avis elle a plus de poids que n'importe laquelle des autres, mais c'est parce qu'elle est douée d'un caractère d'évidence qui saute aux yeux, et c'est surtout parce qu'elle s'étend plus loin encore qu'à la seule constitution des gaz. Elle nous ramène ainsi en plein cœur de notre sujet.

Avec un milieu formé de parties matérielles désagrégées et indépendantes entre elles, il est, avons-nous vu, à tout jamais impossible de constituer une onde sonore dont la vitesse de propagation soit indépendante de la vitesse d'impulsion. Il l'est encore bien plus de constituer soit une onde lumineuse, soit une onde calorifique.

Ni les gaz, ni bien moins encore le milieu interstellaire ne peuvent être formés de parties *disjointes*, désagrégées, sans solidarité réciproque continue : quelle que soit d'ailleurs la nature de ces parties, qu'elles soient formées d'atomes matériels, comme il en est quant aux gaz, ou qu'elles soient absolument différentes de la Matière, comme il en est de la Substance qui remplit l'Espace et qui se manifeste comme Élément dynamique, comme Élément de relation en dehors des corps et dans les corps.

Cette seule objection suffirait pour réduire à néant toutes les Cinétiques imaginables de l'Univers; mais il reste huit autres objections debout, et parfaitement intactes.

La Théorie cinétique des gaz étant une fois pour toutes éliminée, nous sommes bien obligés de chercher la cause de l'élasticité de ces corps ailleurs que dans des mouvements fictifs de l'atome matériel, et ce que nous disons des gaz s'applique rigoureusement à tous les corps, aux liquides comme aux solides. Si les atomes ne se meuvent pas dans les gaz, ils ne se meuvent pas plus dans les liquides et les solides.

Cette cause de l'élasticité n'est pas difficile à apercevoir, dans son *espèce*. Si l'on s'était laissé guider par l'analogie, si l'on était simplement parti des faits connus et très bien étudiés, on n'aurait certainement pas imaginé un système aussi bizarre, aussi artificiel que celui par lequel on prétend représenter tout l'ensemble des phénomènes dynamiques de l'Univers.

Les défenseurs les plus ardents de la Théorie cinétique sont bien obligés de reconnaître aujourd'hui que quand un rayon de lumière ou de calorique traverse un gaz, un liquide, un solide, diaphane ou diathermane, ce n'est point la MATIÈRE de ces corps qui vibre, mais que c'est un ÉLÉMENT *absolument distinct* qui est en jeu. — Lorsqu'on comprime ou qu'on raréfie un gaz, son indice de réfraction change; il existe donc une corrélation intime entre la position relative des atomes matériels et l'ÉLÉMENT qui vibre lumineusement et caloriquement. Il est absolument impossible de rendre compte de ce fait lorsqu'on suppose les molécules indépendantes entre elles et, par conséquent, aussi sans connexion avec le milieu dont les mouvements constituent pour nous la lumière et la chaleur. Lorsque les vibrations calorifiques sont arrêtées par un corps non diathermane, lorsque, comme on dit

en Physique, les rayons sont absorbés et prennent la forme de chaleur sensible, la température du corps s'élève et il se produit, ou du moins il peut se produire des effets mécaniques internes et externes de tous genres. L'idée naturelle et rationnelle qui se présente à l'esprit, c'est d'attribuer ces effets à l'ÉLÉMENT même qui donne lieu aux phénomènes de lumière et de chaleur rayonnante, soit dans les corps, soit dans l'Espace interstellaire.

Dans cet Espace infini, nous sommes obligés aujourd'hui aussi de reconnaître l'existence de l'ÉLÉMENT spécifiquement distinct de la MATIÈRE, qui donne lieu aux manifestations de l'électricité. Or l'électricité, soit en repos (statique), soit en mouvement (improprement appelée dynamique), ne se manifeste à nous en quelque sorte que comme *Puissance dynamique*, que comme FORCE. C'est une remarque à laquelle, chose vraiment étrange, on n'a jamais fait attention. De plus, quels que soient ces effets dynamiques, pas un seul d'entre eux ne peut être attribué à une simple action *impulsive*, ressemblant même de très loin à ce que nous appelons *choc*. Tous évidemment relèvent d'une action spécifique, formant l'un des attributs les plus essentiels de cet Élément. Il est, en un mot, désormais impossible de considérer l'électricité comme un simple *véhicule* de Force, ainsi qu'on a essayé de le dire tant de fois : elle constitue une FORCE proprement dite.

En partant de là, l'idée naturelle et rationnelle, je le répète, est d'assimiler la chaleur à une Force proprement dite remplissant l'Espace, comme l'électricité, comme l'Élément qui détermine ce que nous appelons l'attraction newtonienne, et faisant de même partie intégrante des corps, capable d'y agir comme Puissance répulsive interatomique. Puissance dont l'intensité est tout à la fois une fonction de la distance réciproque des molécules et *des effets mécaniques qu'elle détermine*.

C'est sur ce dernier fait uniquement qu'il y a lieu de nous arrêter, car c'est lui qui uniquement a donné à la Cinétique sa raison d'être, son caractère précieux et séduisant, du moins aux yeux de la moyenne des esprits. Je vais le faire ressortir avec insistance et dans toute sa force, parce que c'est dans le fait même qui a donné aux Théories modernes leur solidité apparente que nous puiserons une interprétation rationnelle et absolument contraire à ces Théories.

Je cite de suite les deux phénomènes les plus frappants en ce sens.

1° Dans l'expérience du frein de Prony, il se produit continuellement de la chaleur, en quantité rigoureusement proportionnelle au travail mécanique dépensé pour le frottement. Ce n'est en aucune façon l'*usure* des surfaces frottantes qui rend compte de ce développement; dans les freins que l'on construit aujourd'hui, on a su annuler presque complètement toute usure et l'appareil peut fonctionner des journées entières sans aucune détérioration.

2° Dès l'année 1855, j'ai montré, par des expériences faites sur une échelle immense, que, dans une machine à vapeur, il entre continuellement plus de chaleur dans la chaudière qu'il n'en sort avec l'eau de condensation, et que ce qui reste en route est proportionnel au travail externe total produit par le moteur.

Comment rendre compte d'un fait aussi caractéristique?

Voici l'ordre de raisonnements qui, à peu près sans exception, a été suivi pour arriver à une explication de ces deux faits opposés :

« Si la chaleur était un Être réel, une Substance ressemblant de près ou de loin à la MATIÈRE, elle ne pourrait ni être créée ni disparaître, par suite de tel ou tel phénomène mécanique; elle serait là une fois pour toutes quantitativement et qualitativement. La chaleur n'est donc qu'un mouvement de la Matière même et ainsi s'expliquent avec la plus grande clarté tous ses effets mécaniques. »

De là sont nées ces expressions de *transformation*, de *conversion* de Forces les unes en les autres, qui ont pris pompeusement possession du domaine de la Physique générale. Il en est dans le nombre qui ne laissent pas que d'être plaisantes. Une chaudière à vapeur vient-elle à faire explosion, ce n'est plus l'excès de pression qui en est la cause, c'est le mouvement-chaleur, c'est la force vive des molécules de vapeur qui, ne pouvant plus se *transformer* assez vite en mouvement du piston et celui-ci à son tour en *mouvement-pesanteur* (!!!), a rompu les parois métalliques. — Que l'on me pardonne une pareille citation; mais en vérité, lorsque je l'appelle plaisante, c'est le terme le plus adouci qu'on puisse y appliquer.

Le raisonnement ci-dessus est, disons-nous, spécieux. Il n'est que cela.

Puisque nous ne pouvons plus désormais considérer la chaleur sensible comme un mouvement, il faut bien chercher une autre explication. On l'eût trouvée dès l'origine, si l'on n'avait pas, en quelque sorte, à plaisir rompu le lien de l'analogie.

Dans nos expériences de laboratoire, dans nos observations des phénomènes de la Nature, tout comme dans leur interprétation, nous ne nous préoccupons en général nullement du milieu ambiant dynamique où se passent les phénomènes et sans lequel ces phénomènes ne seraient pas plus possibles que la combustion, par exemple, ne le serait sans l'oxygène de l'air. Lorsque nous sommes témoins de l'expérience du frein de Prony, nous ne doutons pas un instant que la chaleur continuellement développée *ne naisse sur place*, et ne pouvant naturellement rien comprendre à une pareille création, nous faisons vibrer le métal de la poulie, le bois des mâchoires, etc. Il ne nous vient pas à l'esprit que cette chaleur pourrait bien dépendre de la connexion de tout le système avec l'Élément qui, jusqu'à l'infini, remplit tout l'Espace ambiant. Et pourtant en Physique, nous sommes journellement témoins de tout un ordre de phénomènes où l'intervention de ce milieu ne peut être contestée.

Le frottement développe, il *crée en apparence* de l'électricité dans mille et mille cas. Aucun Physicien sensé n'a pourtant jamais pu admettre que l'électricité statique accumulée sur les conducteurs de nos machines soit un produit des vibrations du plateau de verre transmises au conducteur par les pointes des mâchoires. Une pareille explication, fût-elle même admise au cas des machines à frottement, tomberait d'elle-même pour les machines à induction (Holtz, Carré, etc.); elle tomberait pour les machines électromagnétiques. Il est évident que pour toutes ces machines il n'y a qu'une seule explication valable. — Par suite d'actions mécaniques, ou chimiques, ou autres, l'équilibre est rompu dans l'Élément électrique qui se trouve dans l'Espace aussi bien que dans les corps eux-mêmes; la tension, ou, ce que d'une façon correcte et expressive, nous pouvons appeler la *température électrique*, s'élève en un point et s'abaisse en un autre. Il y a en ces cas forcément *équivalence numérique* entre le travail mécanique dépensé ou engendré, d'une part, et l'accroissement ou la diminution d'*intensité* dans

l'Élément dynamique en jeu, d'autre part. En tout cela, nous ne créons rien du tout, nous développons un état polaire, positif et négatif, qui équivaut nécessairement au travail mécanique en jeu. — Pour peu que nous considérons les choses avec attention, nous reconnaissons qu'il n'est pas un seul phénomène électrique où nous puissions faire abstraction du milieu dynamique ambiant et partout répandu. Une tache, une éruption qui se produit sur la surface du Soleil a son écho sur notre Terre et trouble l'équilibre de l'état magnétique du globe. Et de même, sur une échelle microscopique, dès qu'une de nos machines d'induction fonctionne, l'équilibre électrique est rompu au loin. C'est une des plus belles conquêtes de la Science moderne d'avoir établi de tels rapports, et pourtant dès qu'il s'agit d'interpréter tel ou tel phénomène qui se passe sous nos yeux, nous nous mettons à l'isoler soigneusement, comme s'il pouvait avoir lieu sans tout ce qui l'entoure.

Ce que nous disons des phénomènes électriques s'applique mot pour mot aux phénomènes thermiques. Le frottement du mercure contre le verre de la chambre barométrique développe la polarité électrique. Mais comment le savons-nous? — Par la radiation lumineuse et calorifique que produit à peu près simultanément le rétablissement de l'équilibre électrique rompu par l'acte mécanique; nous n'avons à recourir ici à aucune vibration matérielle pour expliquer le phénomène. En est-il autrement dans l'expérience du frein de Prony? — Oui, si par la pensée nous isolons l'appareil; si nous ne tenons aucun compte du milieu où il agit. Assurément non, si nous restons dans la réalité, si nous nous rappelons, d'une part, que sans l'Élément dynamique ambiant (Force gravifique, Force électrique, Force calorifique) nos moteurs n'existeraient pas même, et que la poulie du frein resterait immobile; si nous remarquons, d'autre part, que la résistance qui naît du frottement des surfaces en regard n'est due en définitive elle-même qu'à une rupture continue dans l'équilibre des Forces qui tendent à maintenir la position relative des atomes matériels. Le frottement des mâchoires du frein fait naître la *polarité thermique* aussi bien qu'un frottement quelconque fait naître la polarité électrique; il est même extrêmement probable que toutes deux ont lieu simultanément et que l'une fait simplement place à l'autre. L'intervention de vibrations moléculaires ne devient nécessaire que quand on sort de

la réalité, que quand on oublie la présence de l'Élément dynamique en activité continue dans les corps aussi bien qu'en dehors d'eux.

Ce que nous disons des phénomènes où il *semble naître* de la chaleur, de l'électricité, est rigoureusement semblable pour ceux où il semble en *disparaître*. Ici encore il ne s'opère qu'un déplacement, qu'un abaissement dans l'*intensité actuelle* de telle ou telle Force en jeu ; mais, en réalité, rien n'est détruit ou anéanti, et il n'est nullement nécessaire de recourir à des vibrations fictives de molécules pour interpréter correctement les phénomènes.

En résumé, plus nous étudions les faits sévèrement et attentivement, plus nous demeurons convaincus que ce qui nous apparaît comme des créations ou des disparitions (impossibles) de certains agents et ce que l'on s'est hâté d'expliquer par des vibrations de l'atome matériel, résulte de simples déplacements d'énergie, et de la production d'un état polaire ; que ce qu'on a appelé avec tant d'emphase transformations de Forces ne résulte que de simples substitutions d'actions dynamiques les unes aux autres.

Si, en tout ce qui précède, j'ai su m'énoncer avec la clarté voulue, le lecteur doit être frappé de la conclusion générale qui se formule d'elle-même devant nous.

La Doctrine qui reste debout après la réfutation de toutes les Théories dites cinétiques, la Doctrine du Dynamisme, ne constitue pas, à proprement dire, une interprétation des phénomènes ; elle n'est que l'énoncé et la classification stricte des faits. Et c'est précisément là ce qui enlève à cette Doctrine tout caractère hypothétique ou systématique.

Entre les sphéroïdes parfaitement définis de forme qui se meuvent dans l'Espace, entre les Soleils et les Planètes, entre les Planètes et les Satellites, il se trouve un milieu qui met ces corps en rapports continus d'attraction, de lumière, de chaleur, d'électricité..... L'observation et la discussion la plus rigoureuse des faits nous montrent que la nature de ce milieu est absolument différente de celle de la MATIÈRE qui forme la *masse* des sphéroïdes. L'obstination propre aux systèmes a seule pu assimiler entre elles les Substances en regard. En appelant ÉLÉMENT DYNAMIQUE ou FORCE le milieu qui constitue l'Espace interstellaire et en appelant MATIÈRE l'Élément qui, en

partie, constitue les sphéroïdes distincts, nous n'interprétons pas, nous *classons*. L'hypothèse, la fantaisie, la chimère commenceront quand nous nous mettrons à expliquer l'action réciproque des deux Éléments en regard. L'hypothèse, disons beaucoup plus nettement, l'absurde, commencera quand nous chercherons, par exemple, des actions impulsives là où il n'existe rien qui puisse *heurter et pousser*.

Si, de l'Espace céleste, nous passons aux corps eux-mêmes, nous reconnaissons que l'Élément ou les Éléments qui remplissent l'Espace, constituent aussi, en partie, les corps; que les actions dynamiques qui se manifestent entre les sphéroïdes célestes se manifestent aussi dans les corps mêmes et rendent les parties matérielles solidaires entre elles. En ce sens encore, nous n'expliquons rien, nous *classons*. L'hypothèse gratuite commencera seulement quand nous essayerons de rendre compte, de *peindre* l'action réciproque des Éléments en regard.

En partant des apparences, nous sommes amenés à admettre provisoirement qu'il existe *plusieurs* Éléments méritant le titre de FORCES. La discussion impartiale d'observations ou d'expériences nouvelles pourra seule nous apprendre si le milieu qui met en rapport d'attraction des corps séparés par des intervalles de milliards de mètres est le même que celui qui donne lieu aux manifestations de chaleur, de lumière, d'électricité; ou si ce qui nous apparaît comme provisoire ne doit pas rester définitif. Jusqu'ici, je ne crains pas de le dire bien haut, l'arbitraire, la fantaisie, sous leur forme la plus libre, ont seuls affirmé l'unité de l'Élément dynamique.

Si de l'ÉLÉMENT DYNAMIQUE nous passons à l'ÉLÉMENT MATIÈRE, la même question se pose, mais elle reçoit pourtant déjà aujourd'hui une réponse beaucoup plus catégorique. — Les partisans de l'Unité de la Matière ont fait des efforts incroyables pour nous démontrer qu'il n'existe qu'un seul Élément chimique primitif; mais s'il est un ordre d'études où la fantaisie se soit donné plus libre carrière, c'est certainement celui-ci. Et il faut bien le dire, la naïveté coudoie ici l'arbitraire. — Réduisez, dit-on, le volume de l'hydrogène de un à un deux cent cinquante millièmes, et vous aurez du platine (avec un peu moins de réduction, on aurait sans doute de l'argent, ou le *vil plomb!!!*). Pour que de pareilles assertions prissent un caractère scientifique et quit-

tassent la forme de simples plaisanteries, il faudrait au préalable établir que les propriétés chimiques des corps ne dérivent que de la densité ; il faudrait ensuite nous apprendre comment cette réduction de volume de l'hydrogène est devenue définitive pour certaines parties du gaz ; et puis, enfin et surtout, il faudrait prouver qu'une telle réduction est réellement possible. Or, c'est en ce sens que les faits bien étudiés protestent de la façon la plus éclatante. Pour ne citer qu'un exemple entre mille, je dirai que les raisonnements les plus inattaquables nous montrent que le volume de l'eau à quatre degrés ne diminuerait pas d'un dixième si nous pouvions appliquer au liquide une pression externe infinie. En d'autres termes, le volume total et *immuable* des atomes s'élève pour ce corps aux neuf dixièmes du volume apparent occupé au maximum de densité (4°). Je puis à cet égard me permettre de renvoyer le lecteur à la dernière partie de mon Ouvrage de Thermodynamique. Il verra qu'il existe plus d'une bonne raison pour admettre que ce que nous appelons Éléments chimiques ne sont pas des fictions. — Je ferai à ce sujet une seule remarque. Les personnes qui, *a priori* et sans qu'on aperçoive trop pourquoi, soutiennent que l'hydrogène est le seul Élément primordial existant, sont obligées d'opter entre deux solutions pour expliquer la résistance absolue qu'opposent à une décomposition ultérieure les Éléments chimiques actuellement admis.

1° Ou bien c'est par la volonté du Créateur que les choses sont et restent telles quelles ;

2° Ou une Force était primitivement en jeu qui est depuis complètement endormie.

Du moment qu'avec pleine raison d'ailleurs on fait intervenir la Puissance créatrice dans la question, il devient vraiment risible de dire que cette Puissance a eu plus de peine à créer du phosphore, du soufre, , que l'hydrogène primordial et de vouloir lui simplifier, disons bien au contraire, lui compliquer la besogne en la forçant à fabriquer tous les Éléments avec un seul. D'un autre côté, admettre une Force désormais endormie, c'est-à-dire sans existence effective, c'est certainement quitter absolument le domaine de la Science pour passer sur celui des rêves.

L'unité de la Matière, disons, l'identité des atomes matériels, est pour le

moment insoutenable dans la Science rationnelle. Il est probable qu'il en est de même de l'unité des Forces.

Ce problème toutefois rentre en plein dans le domaine de l'expérience et de l'observation ; les systèmes, les idées préconçues, les conceptions *a priori* n'ont aucun droit de cité dans la discussion.

La Doctrine du Dynamisme, avons-nous dit, est, à proprement parler, non une interprétation, mais une classification des Éléments de l'UNIVERS INANIMÉ, du Monde physique. Cette classification, et c'est là ce qui fait sa force, repose sur l'emploi de la méthode d'élimination successive. — En ce monde, nous ne comprendrons jamais en quoi consiste l'essence de l'Élément Matière, de l'Élément dynamique ou Force; mais en éliminant successivement ce qu'il est impossible d'admettre quant à la nature de ces Éléments, nous arrivons à savoir positivement ce qu'ils ne sont pas. C'est là un chemin immense de fait déjà. — L'existence de l'Élément dynamique, tant de fois niée par cette raison unique, mais fort mauvaise, que nous ne la comprenons pas, ne peut plus être contestée aujourd'hui. Le rôle, les fonctions de cet Élément sont même nettement définis et délimités. La fonction dynamique, celle qui vaut à cet Élément le nom accessoire de Force, n'est pas à beaucoup près la seule. La chaleur, la lumière, l'électricité, ne se manifestent pas seulement comme causes de mouvement de la Matière pondérable, elles constituent de plus, et peut-être surtout, des *Agents* de relation entre les Êtres, inanimés ou animés; ce sont elles qui révèlent en quelque sorte une existence à une autre. En ce sens la dénomination générale d'Éléments intermédiaires est encore plus correcte que celle d'Éléments dynamiques.

Je viens de prononcer le mot : *Êtres animés*. — Dans ces pages, qui de fait ne sont qu'une suite de réfutations de critiques plus ou moins bien, plus ou moins mal fondées, je me suis soigneusement tenu sur le domaine exclusif des phénomènes physiques. C'est, en effet, sur ce terrain que la lutte entre les Théories dites Cinétiques de l'Univers et la Doctrine dynamique devait commencer et se terminer. Avant de prétendre construire le dernier des Êtres vivants, il faut du moins savoir constituer un cristal, une combinaison chimique, allons bien plus loin, un gaz. Et c'est ce dont ces Théories sont défini-

tivement incapables. Le terrain de la Philosophie scientifique se trouve ainsi une fois pour toutes débarrassé d'un bon nombre de folies (on ne saurait employer de terme plus doux), dont la moins singulière assurément n'est pas celle qui consiste à assimiler le cerveau de l'homme ou des animaux supérieurs à un jeu de billard, où des milliards de billes, en s'entre-choquant au hasard, produisent la pensée, sous toutes ses formes, le sentiment de l'affectivité, celui du Beau.....

Reste maintenant à chercher si la Doctrine dynamique, correcte et suffisante quant aux phénomènes physiques, répond à l'universalité des phénomènes. En ce sens encore, n'était l'obstination des idées préconçues, des partis pris, des systèmes, la méthode de l'élimination successive aurait montré depuis longtemps qu'il faut un Élément, disons, une Classe d'Éléments de plus pour construire, non pas même un Être vivant, mais seulement une cellule organique. Elle nous eût appris depuis longtemps qu'avec toutes les Forces réunies du Monde physique il n'est pas plus possible de fabriquer un cerveau pensant qu'il ne l'est de constituer un gaz avec les seuls mouvements de l'atome pondérable.

Dans le plus minime des Êtres organisés, cette méthode nous fera toujours trouver un Élément spécifique qui se manifeste, non plus comme Puissance dynamique, mais comme Puissance directrice et coordinatrice, En montant de degrés en degrés, elle nous fera toujours aboutir à cet ÉLÉMENT ANIMIQUE PENSANT, dont aucune Force proprement dite ne tiendra jamais lieu et n'expliquera la plus minime des manifestations.

