

# R. CLAUDIUS

## SA VIE, SES TRAVAUX ET LEUR PORTÉE MÉTAPHISIQUE

---

### PRÉAMBULE

La théorie mécanique de la chaleur, qui n'a guère conquis droit de cité dans la science que depuis quarante ans, et qui a cependant déjà opéré une véritable révolution en physique et en mécanique, une révolution plus considérable encore dans l'immense domaine des applications industrielles, repose tout entière sur deux principes fondamentaux.

Ces principes ont été, l'un comme l'autre, discutés et combattus avec âpreté à leur origine, subissant le sort commun imposé aux idées géniales par la prudence timorée de quelques esprits profonds, la réserve chère aux pontifes de la science, la basse jalousie d'émules envieux, quoique non dépourvus de mérite, la paresse enfin du grand nombre, qui trouve bien plus commode de ne sortir de sa torpeur, pour aborder un sujet nouveau, que quand la retraite des derniers opposants lui enlève enfin sa dernière excuse, mettant volontiers en pratique

cette maxime épicurienne de Montaigne : l'ignorance et l'incuriosité sont un doux et mol oreiller pour une tête bien faite.

Robert Mayer et Rodolphe Clausius ont connu ces déceptions amères, comme les avaient connues les Christophe Colomb, les Copernic, les Galilée, les Kepler, et tant d'hommes de génie, comme les connaîtront tous ceux qui ouvriront à l'humanité, à la science ou à l'art des voies nouvelles.

Robert Mayer, l'auteur du premier principe fondamental, l'inventeur de la théorie mécanique de la chaleur, a même, plus encore que Clausius, souffert de l'indifférence ou de l'hostilité de ses contemporains.

Quoiqu'il eût, dès 1842, développé son principe, et toutes les conséquences de celui-ci dans le domaine des sciences de la nature, quoique Prescott Joule fût arrivé, en 1843, au même principe par la voie expérimentale, Colding et Deprez, également peu de temps après, quoique Helmholtz eût publié, en 1847, son petit ouvrage, si apprécié aujourd'hui, et qui passa presque inaperçu alors, sur la conservation de la force, Mayer eut le chagrin de voir l'un des plus éminents physiciens contemporains, sir W. Thomson, hésiter, jusqu'en 1849, à admettre son principe.

Rodolphe Clausius, qui dota, en 1850, la théorie mécanique de la chaleur de son second principe fondamental, et qui fut le propagateur, on peut même dire, à juste titre, le véritable inventeur de la théorie cinétique des gaz, a vu plus rapidement son principe acquérir droit de cité dans la science.

Ce n'est pas qu'au début on n'ait vivement attaqué ses théories, et même, chose étrange, son analyse mathématique, quoiqu'il semble que, dans ce dernier domaine, un point une fois établi doive être admis sans conteste.

Mais, dès 1851, W. Thomson démontrait, de son côté, par une voie différente, le second principe fondamental,

qu'il appliquait plus tard, le premier, aux phénomènes thermoélectriques et à ceux de l'élasticité; et Rankine, tout en cherchant à éviter de faire usage du principe énoncé par Clausius, n'a pu édifier sa théorie sans recourir à ce même principe, mis sous une autre forme, et exposé d'une manière moins satisfaisante.

Hirn, Maxwell, Tait ont également combattu plusieurs de ses idées, mais toutes sont restées debout, et il a eu la joie suprême d'assister à leur triomphe.

#### VIE ET CARACTÈRE DE CLAUDIUS.

Rodolphe Clausius est né à Köslin le 2 janvier 1822. Il était le plus jeune des dix-huit enfants d'un inspecteur d'enseignement primaire (*Regierungsschulrath*) qui obtint, comme retraite, la cure de Uckermünde. Après avoir reçu de son père l'instruction élémentaire, le jeune Clausius suivit les deux classes supérieures du gymnase de Stettin, où il se distingua déjà en mathématiques et en physique. A l'université de Berlin, néanmoins, il hésita quelque temps entre ces sciences et l'histoire; les leçons de Ranke l'intéressaient vivement; un penchant plus vif le décida bientôt à consacrer tout son temps à celles d'Ohm, de Dirichlet, de Steiner, de Dove, de Magnus.

Commencées en 1840, ses études furent interrompues en 1843: fils et frère dévoué, il accepta une position de précepteur, afin de n'être pas plus longtemps à charge à sa famille. De 1844 à 1850, nous le voyons enseigner dans un gymnase de Berlin. Il trouve dans cette nouvelle position le temps de continuer ses études, et obtient, en 1848, son diplôme de docteur, après avoir soutenu une thèse intitulée: *De iis atmospheræ particulis quibus lumen reflectitur.*

Ses premiers travaux lui font obtenir, en 1850, la position moins astreignante de professeur de physique à

l'École royale des ingénieurs et de l'artillerie de Berlin; c'est en cette même année qu'il présenta à l'Académie des sciences de cette capitale son premier mémoire sur la théorie mécanique de la chaleur. En même temps, il enseigna à l'Université de Berlin en qualité de privat-docent.

Quelques années plus tard, il fut nommé professeur ordinaire à l'École polytechnique, puis à l'Université de Zürich (1855 et 1857).

C'est au milieu de cette nature à la fois riante, grandiose, majestueuse ou terrible, suivant l'horizon que l'on contemple, que s'écoulèrent les jours les plus enchantés de Clausius. Il y épousa, en 1859, Adélaïde Rimpan, et jamais union ne fut plus solide, plus heureuse et mieux assortie. Bien souvent sa femme et lui m'ont parlé à Bonn de ces années de paix et de joie, qu'ils se rappelaient toujours avec une douce émotion.

C'est en 1869 que Clausius fut appelé à remplacer Plücker dans la chaire de physique à l'Université de Bonn, après avoir occupé, pendant deux ans seulement, la même chaire à l'Université de Würzbourg.

Par sa position pittoresque, assise au bord du Rhin, en face des Sept Montagnes, fort visitée également par les étrangers, l'ancienne ville électorale était devenue bien chère aux deux époux par les traits de ressemblance qu'elle leur offrait avec leur ancien séjour en Suisse.

Que de souvenirs charmants j'ai gardés dans mon cœur de cette maison hospitalière, de cette famille si profondément unie, dans laquelle régnait cette cordialité intime que les Allemands rendent par le terme intraduisible de *gemüthlich!*

Une après-midi, M<sup>me</sup> Clausius ouvre le piano et fait chanter ses enfants en les accompagnant; ils étaient là trois ou quatre, âgés de six à douze ans. Sur un ordre de la mère, ils tiennent tous les mains jointes, afin, sans doute, d'être exempts des distractions auxquelles le jeu de leurs petits doigts eût pu les exposer, et chantent, avec un ensemble parfait, quelques *Liedchen*.

« Savez-vous, me dit Madame, quelles sont ces petites chansons que les enfants viennent de dire? » Et, me montrant un recueil manuscrit: « Les voici, ajouta-t-elle, elles ont été composées, paroles et musique, par Kirchhoff, l'un de nos meilleurs amis de Zürich. » Oui, le puissant inventeur de l'analyse spectrale, l'auteur de tant de théories transcendantes en physique mathématique, était aussi un musicien distingué, et savait composer de jolies chansons pour les enfants.

Je l'ai vu arriver un jour, à l'improviste, dans l'appartement que Clausius occupait à Paris pendant la réunion du Congrès de l'électricité en 1881, et je n'oublierai jamais le visage épanoui, le regard pénétré et humide, le geste d'empressement fraternel, le son vibrant de douce et profonde émotion avec lequel Clausius le reçut en s'écriant: « Comment! c'est toi! »

On eût dit qu'il retrouvait un frère échappé, comme par miracle, à de grands dangers.

Clausius se trouvait si bien de son séjour à Bonn qu'il m'a déclaré n'avoir nulle envie d'échanger sa position, même contre une chaire à l'Université de Berlin, si celle-ci lui était offerte. On voulut l'appeler à Strasbourg, où le gouvernement allemand avait fait édifier de vastes et riches bâtiments universitaires; mais il déclina l'offre, quelque avantageuse qu'elle pût être.

Plus tard seulement, après qu'il eut eu la profonde douleur de perdre sa femme bien-aimée, lorsque l'âge et le chagrin lui inspirèrent le goût de quelque repos, il hésita à refuser une très belle position qu'on voulait lui faire à l'Université de Göttingue, où il n'aurait plus eu à se charger que de la physique mathématique exclusivement. Peut-être le gouvernement prussien, peu favorable à l'Université qui avait conservé des sympathies guelfes, tint-il, pour ce motif, à ne pas laisser Clausius quitter Bonn; et c'est sur les instances qui furent faites auprès de lui, et sur la promesse de l'établissement très prochain

d'un institut physique, bâti, en effet, en 1883, qu'il se décida enfin à refuser la chaire de Göttingue.

Aux heureuses années de Bonn succédèrent trop tôt des années d'un deuil inoubliable, qui abrégéa certainement les jours de Clausius.

En 1875, M<sup>me</sup> Clausius mourait en mettant au monde une fille, le sixième de ses enfants.

Clausius se consacra tout entier à eux, avec un tact, une douceur, une tendresse, et à la fois une autorité telles que ses filles mêmes, au nombre de quatre, n'eussent souffert de cette perte cruelle, ni dans les soins maternels, ni dans l'éducation qu'elles recevaient, si déjà la plupart n'avaient été d'âge à ressentir douloureusement le vide irréparable que la mort avait creusé dans leur cœur, et davantage encore dans celui de leur père; car, à elles du moins, il restait l'avenir.

Jamais je n'ai rencontré une petite fille aussi riante, aussi joyeuse, d'une gaité aussi exubérante, que cette dernière enfant qui n'avait jamais reposé sur le sein maternel; son père avait bien certainement été en même temps sa mère.

Bonn m'avait toujours vivement attiré, depuis que j'y avais fait, sous la direction d'Argelander et de ses assistants, MM. Schönfeld et Krueger, mes premières armes en astronomie pratique, pendant plusieurs périodes de vacances.

Le séjour de Clausius dans cette ville m'engagea à aller y passer un mois avec ma famille pendant l'été de 1879.

Que d'excursions charmantes il m'a fait faire en compagnie de ses enfants! Rarement il pouvait nous suivre: ayant pris part, dans le service des ambulances, avec une compagnie universitaire qu'il commandait, aux sanglantes affaires de Mars-la-Tour et de Gravelotte, il en avait rapporté une blessure au genou, dont il éprouva toujours une certaine difficulté de locomotion. Quelque-

fois il venait nous rejoindre à cheval, et c'était avec une sollicitude toute maternelle qu'il s'enquérait de la manière dont ses enfants s'étaient amusés, des divers incidents de l'excursion, qu'il veillait lui-même à leur procurer des bas secs, lorsque, dans la fougue du jeu, ils s'étaient avancés trop près du rivage et fait mouiller les pieds par les flots du Rhin.

Un jour, il nous confia, à ma femme et à moi, la direction d'une excursion à la Löwenburg, l'une des Sept Montagnes, dont la cime s'élève de 400 mètres au-dessus du fleuve.

A peine avions-nous quitté le train qui nous avait débarqués à Rhöndorf qu'une pluie assez forte commença de tomber. Nous délibérâmes s'il n'était pas préférable de remettre la promenade à un autre jour ; mais les enfants avaient tant d'entrain et de bonne humeur qu'il fallut continuer l'ascension en dépit du temps et du chemin tout détrempé ; celui-ci, du reste, était charmant, circulant dans un vallon herbeux, d'une verdure alpine, bordé de part et d'autre de forêts gravissant d'étage en étage les flancs des Sept Montagnes. Arrivés au sommet, l'entrain reprit de plus belle, surtout après qu'on se fut restauré ! Et c'était merveille de voir ces enfants, dont l'aîné n'avait pas dix-huit ans, improviser des quatrains fort bien tournés sur les péripéties de l'expédition. Ils m'obligèrent même à m'exécuter aussi, et l'on trouvera peut-être encore inscrit sur le registre de l'hôtel, *horresco referens*, le seul distique allemand dont je me sois jamais rendu coupable.

Cependant Claudius, que ses occupations avaient retenu à Bonn pendant l'après-midi, s'était attendu à nous voir rentrer à cause de la pluie qui n'avait cessé de tomber. L'inquiétude enfin le gagna ; il voulut nous envoyer des voitures, les cochers déclarèrent que les chemins étaient absolument impraticables ; il résolut de se transporter à la station où nous devions reprendre le train pour Bonn.

A notre arrivée, il était en proie à une vive préoccupation ; bientôt la bonne humeur de ses enfants, qu'il avait accueillis avec cette tendresse et cette douceur inaltérables qui ne le quittaient jamais, eut dissipé ses soucis ; il nous les conta en quelques mots : « Et maintenant, mes enfants, ajouta-t-il, vous êtes tout mouillés ; venez avec moi, je vous ai fait préparer dans le voisinage un bon feu et des vêtements de rechange. » Exquise prévoyance paternelle, qui dépeint si bien l'homme que je n'ai pu m'empêcher de rappeler cet incident.

S'il n'avait été si profondément estimable et si digne d'être aimé, s'il n'avait été homme du devoir autant au moins qu'homme de science ou de génie, peut-être eussé-je parlé de ses travaux, mais j'aurais gardé le silence sur sa vie privée.

La bienveillance, la simplicité, l'égalité d'humeur, la bonté surtout formaient le fond de ce caractère généreux et sensible. Combien il s'est tourmenté des marques de déférence que je lui donnais dans mes lettres, jusqu'à ce qu'enfin, pour lui en témoigner davantage, je me fusse conformé à son désir en l'appelant simplement « Mon cher Clausius » ! Son cœur était vivement épris d'amitié et d'affection. Aussi, quand vint à se marier sa fille aînée, qu'une sœur cadette devait bientôt imiter, quand ses deux jeunes gens durent fréquenter les universités étrangères, la solitude commença à lui peser lourdement.

Il se remaria en 1886 avec Mademoiselle Sophie Sack, personne très distinguée, assez mûre pour diriger son ménage, assez jeune pour devenir, comme elle le fut en réalité, la sœur aînée des filles qui lui restaient.

J'ai été témoin, l'été suivant, du bonheur de cette union, et, fait plus rare, de la vive amitié, de l'affection tendre qui s'était nouée, avec une familiarité toute fraternelle, entre les filles de mon ami et leur seconde mère. Celle-ci, dans ses conversations intimes avec ma femme, ne tarissait pas d'éloges sur la bonté ineffable de son mari. Le seul souci



qu'elle manifestât était la crainte de ne pas le conserver longtemps; était-ce un pressentiment?

Pendant le courant de l'été 1888, Clausius fut atteint d'une anémie pernicieuse. La maladie ne l'empêcha pas de continuer à travailler à la publication, en trois volumes, de la dernière édition de sa *Théorie mécanique de la chaleur*. Il m'avait envoyé le texte des deux premiers volumes, corrigé à la main sur la deuxième édition, afin que la traduction que j'en faisais, en collaboration avec M. Ronkar, fût conforme à la dernière édition allemande. L'impression de la traduction du second volume était même commencée avant qu'il parût en allemand, et Clausius en revoyait avec soin les épreuves. Bientôt, hélas! celles-ci ne revinrent plus aussi régulièrement; le texte des corrections n'était plus écrit d'une main ferme; après quelque temps même, elles étaient écrites au crayon. C'est alors qu'habitué au soin tout à fait méticuleux avec lequel Clausius s'occupait de ses travaux, je conçus les craintes les plus graves sur l'état de sa santé. M<sup>me</sup> Clausius, à qui j'en écrivis, n'eut pas même le temps de répondre à ma lettre, et je reçus la triste nouvelle de sa mort, survenue le 24 août.

J'ai beaucoup connu l'homme et le savant; je n'ai jamais eu le plaisir d'entendre le professeur. Ce dernier apportait dans son enseignement, outre le dévouement, la bienveillance et la bonté, cette clarté et cette précision qui se reflètent dans tous ses travaux; bien plus, il s'y montrait un expérimentateur très habile, quoique jamais il n'ait appuyé aucune de ses recherches sur une expérience personnelle.

Nul savant peut-être n'a consacré des soins plus méticuleux à l'élaboration de ses travaux, sans même excepter Newton, ni Laplace. Il n'est jamais arrivé à Clausius, ce qui arrive en matière scientifique à tous les inventeurs, de devoir revenir sur une des nombreuses assertions qu'il a émises dans la théorie mécanique de la chaleur, qui,

avec ses applications à l'électricité, a fait l'objet constant, sinon exclusif, de ses travaux, et le fond de son œuvre. Peut-être certains opuscules, peu connus en dehors de l'Allemagne, qu'il a écrits sur des sujets d'optique, sont-ils sujets à quelques critiques, de même que ses idées théoriques sur la nature de l'électricité. Mais il a réfuté victorieusement toutes celles qu'on a tenté d'adresser à sa Théorie de la chaleur.

Ses réfutations sont toujours empreintes d'une courtoisie bienveillante à l'égard de ses adversaires, dont il se plaît même à louer le mérite, comme lorsque Hirn essaya de réfuter, par une expérience très ingénieuse, mais mal interprétée par lui, l'axiome, posé par Clausius comme base du second principe fondamental de sa Théorie, que la chaleur ne peut passer *d'elle-même* d'un corps à un autre corps plus chaud ; ou encore lorsque le même savant, se fondant sur des expériences qu'il avait faites, crut pouvoir infirmer la théorie cinétique des gaz, et démontrer mathématiquement la fausseté des résultats de Clausius.

Une sincérité sans bornes, que rien ne pouvait arrêter parce qu'elle n'avait pour objet que la recherche de la vérité, sans aucune préoccupation personnelle, est le trait caractéristique de toutes ses répliques, et rien ne lui était plus odieux que de se voir soupçonner capable d'une arrière-pensée. Aussi, dans sa réfutation de l'esquisse historique de la Thermodynamique, écrite à un point de vue trop peu impartial par Tait, ne craint-il pas de dire : « J'ai l'habitude de m'exprimer toujours ouvertement, et de ne pas laisser entrevoir dans une insinuation quelque chose qu'il n'entre pas dans mon intention de dire réellement ».

Ses goûts le portaient de préférence vers l'exploration de domaines scientifiques inconnus, plutôt que vers des spéculations philosophiques. Comme je lui demandais un jour ce qu'il pensait de l'emploi d'un gyroscope pour démontrer le mouvement de rotation de la Terre (j'ignorais alors que Foucault l'eût imaginé), il me répondit tran-

quillemeut : « A quoi bon chercher à démontrer par de nouveaux procédés des vérités déjà connues? ne vaut-il pas mieux tâcher d'en découvrir de nouvelles? » Aussi a-t-il laissé à William Thomson la gloire d'avoir étendu à l'univers entier le principe découvert par lui-même, et de l'avoir énoncé en ces termes : l'Entropie de l'univers tend vers un maximum.

Mais c'est avec la plus grande modestie, et sans qu'on puisse trouver quelque légère trace d'envie dans sa façon de s'exprimer, qu'il attribue à W. Thomson tout l'honneur de cette découverte, d'une immense portée philosophique.

Ses travaux ont été traduits en plusieurs langues.

Ils se composaient primitivement de Mémoires originaux sur la théorie mécanique de la chaleur et ses applications à l'électricité, ainsi que sur la théorie cinétique des gaz.

Plusieurs de ces Mémoires ont été traduits d'abord dans le Journal de Liouville; j'en ai fait ensuite une traduction complète que Clausius a présentée à l'Institut en ces termes : « J'ai eu l'honneur, en 1864 et 1867, de faire hommage à l'Académie de deux volumes qui contiennent une collection de Mémoires que j'ai publiés sur la *Théorie mécanique de la chaleur*. Les Mémoires contenus dans la première partie avaient pour but d'établir la théorie et de l'appliquer aux divers modes d'action de la chaleur et à la machine à vapeur. Ils forment, dans cette collection, qui est complétée par des Notes et des Additions, un ensemble qui peut être considéré comme un traité de la théorie mécanique de la chaleur.

» M. Folie, de Liège, géomètre habile, connu par ses beaux travaux sur le mouvement des corps solides, a bien voulu faire la traduction française de la première partie, qui vient de paraître chez M. E. Lacroix. Cette traduction est faite avec le plus grand soin et rend mes idées avec beaucoup de précision et de clarté. Comme l'Académie a compté et compte encore parmi ses illustres

membres plusieurs savants qui ont contribué d'une manière éminente aux grands progrès que nos connaissances sur la chaleur ont accomplis dans ces derniers temps et dont est résultée la nouvelle théorie, j'ose espérer que cette traduction ne sera pas dépourvue d'intérêt pour elle, et je prends la liberté de lui en faire hommage au nom du traducteur.

« J'ajouterai que M. Folie s'occupe actuellement de la traduction de la seconde partie, qui traite de l'application qu'on peut faire de la théorie exposée dans la première partie aux phénomènes électriques, ainsi que d'une hypothèse sur la nature de la chaleur, et que, vraisemblablement, cette traduction paraîtra bientôt ».

J. TYNDALL, qui fut le parrain de l'aîné des fils de Clausius, fit à son ami l'honneur de traduire en anglais le premier volume de ses Mémoires.

En 1876-79, CLAUSIUS en publia une deuxième édition entièrement refondue, et me pria de la traduire également. Malgré des travaux d'une tout autre nature, je ne pus décliner cette invitation amicale. J'avais compté sur la collaboration de mon beau-frère L. HOUTAIN, qui mourut bientôt à la fleur de l'âge. Ce n'est qu'après m'être assuré celle de M. RONKAR que j'ai pu mener à bonne fin la traduction des deux premiers volumes ; j'espère que l'éditeur se hâtera d'achever l'impression du second.

Quant au troisième et dernier, dont CLAUSIUS n'avait pu achever le texte, sa préparation a demandé un temps assez long. Elle a été confiée au D<sup>r</sup> C. PULFRICH, privat-docent à l'Université de Bonn, et à M. PLAUCK, professeur à celle de Berlin.

J'ai reçu tout récemment, par les soins obligeants de M. J. CLAUSIUS, le premier fascicule de ce volume, qui sera aussi immédiatement traduit en français, et qui intéresse si vivement le public savant, que des physiciens italiens se sont informés auprès de moi, avant même la mort de Clausius, si ce troisième volume verrait le jour, ou si, à son défaut, je ne voudrais pas me charger de l'écrire.

Quelque temps après la mort de CLAUDIUS, sa famille m'annonça que sa bibliothèque allait être mise en vente ; elle désirait vivement que les nombreux tirés à part, qu'il avait reçus en hommage de tous les physiciens du monde entier, pussent être réunis dans un seul institut scientifique. Je fis à mon gouvernement la proposition de les acquérir pour l'Université de Liège ; c'était, en effet, une occasion de compléter très utilement sa bibliothèque, qui ne reçoit pas la plupart des revues scientifiques spéciales. La proposition fut assez bien accueillie ; malheureusement les lenteurs administratives ne me permirent d'apprendre l'issue favorable qu'elle avait eue que quelques jours après que la bibliothèque de Clausius avait été cédée en bloc à un libraire de Berlin. Il en fut de même de l'autorisation que j'avais sollicitée d'aller, à la prière de la famille, me rendre compte de l'état dans lequel se trouvaient les manuscrits délaissés par Clausius, et dont j'avais promis de faire la traduction française.

Heureusement, on a pu en faire le classement sans mon aide, et, comme il a été dit, l'œuvre complète de Clausius paraîtra bientôt intégralement, tant en allemand qu'en français.

Indépendamment de l'ouvrage dont je viens de parler, Clausius a écrit un volume intitulé : *La fonction potentielle et le potentiel*, que j'ai également traduit en français, et qui est arrivé, en allemand, à sa 4<sup>me</sup> édition ; en outre, une multitude de travaux scientifiques dont les titres seront donnés à la fin de cette notice.

#### ŒUVRES DE CLAUDIUS

Avant d'exposer sommairement les principaux travaux de CLAUDIUS, il ne sera pas hors de propos, pour que le lecteur puisse se rendre un compte exact des progrès qu'il a fait faire à la science, de jeter un coup d'œil d'ensemble

sur ceux qui venaient d'être réalisés. Afin qu'on ne m'accuse pas de partialité à l'égard d'un savant français éminent, dont l'arrière-petit-fils, ingénieur distingué lui-même, est investi aujourd'hui de la magistrature suprême dans son pays, j'emprunterai cette vue d'ensemble au discours prononcé par M. ED. RIECKE, le 1<sup>er</sup> décembre 1888, à l'Académie de Göttingue, pour honorer la mémoire d'un des membres les plus illustres de cette institution scientifique, sur laquelle ont jeté tant d'éclat les travaux de GAUSS et de WEBER.

« Entre toutes les propriétés de la chaleur, aucune ne semblait plus importante, quant à la recherche de son essence, que ce simple fait qu'au contact de deux corps la chaleur passe toujours de celui qui a la température la plus élevée à celui qui a la température la plus basse. De là cette idée, qu'une certaine quantité de chaleur, tout en restant invariable, est capable de se partager de diverses manières entre les corps répandus dans l'espace.

» Du temps de Newton déjà, on était d'accord que cette propriété devait appartenir soit à un corps (un fluide impondérable), soit à un état de mouvement des corps. Dans le cours du siècle suivant, la première théorie avait été de plus en plus universellement admise; l'état calorifique d'un corps était déterminé, suivant elle, par la quantité, contenue dans ce corps, d'un fluide impondérable, le calorique. Comme les éléments des corps, le calorique jouissait de la propriété d'être indestructible et intransformable.

» Jusque dans le milieu du siècle présent, cette théorie pesait sur les esprits de tout le poids d'un dogme, écrasant, par la force de l'habitude, les tentatives timides d'une autre explication, ainsi que les objections importantes auxquelles donnait lieu la production de la chaleur par le frottement. L'esclavage ne fut brisé que par le principe de l'équivalence de la chaleur et du travail. D'après ce principe, la chaleur n'est plus quelque chose d'indes-

tructible et d'intransformable; la chaleur est produite par du travail; la force vive d'un corps en mouvement est transformable en chaleur par le frottement; la chaleur disparaît, lorsqu'elle est employée dans nos machines à produire du travail. Mais combien il est difficile à l'esprit humain de briser les chaînes d'une idée à laquelle il s'est accoutumé!

» La nouvelle théorie ne reçut qu'un froid accueil, et fut combattue pendant un temps assez long.

» MAYER avait étendu le principe de l'équivalence à toutes les forces physiques; JOULE avait perfectionné, avec un zèle infatigable, les méthodes de sa vérification expérimentale; HELMHOLTZ, partant des principes généraux de la mécanique, avait posé le principe de la conservation de la force (on dirait aujourd'hui de la conservation de l'énergie) ou de l'invariabilité de la somme des forces vives et des forces de tension, comme un principe valable pour tous les processus naturels; l'application de ce principe aux phénomènes de l'électricité et du magnétisme l'avait conduit à une série de relations nouvelles et importantes. Et cependant, en 1849, W. THOMSON s'en tenait encore à l'ancienne théorie de la chaleur, reculant devant d'innombrables difficultés qui lui paraissaient insurmontables dans la nouvelle, si on ne la réédifiait complètement sur de nouvelles bases. C'est l'instant où CLAUDIUS travailla, d'une main si heureuse, au développement de la science, déduisant avec clarté les conséquences de la nouvelle théorie, rejetant avec courage les parties en ruine de l'ancienne, et reconnaissant, avec le coup d'œil du génie, dans les erreurs mêmes de celle-ci, les traces de la vérité. Mais pour bien comprendre la portée de la découverte de CLAUDIUS, nous devons revenir à un travail issu de la théorie du calorique, et publié en 1824 par SADI CARNOT, sous le titre de *Réflexions sur la force motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*.

» Le rôle immense que jouait la chaleur comme force

motrice, depuis la découverte de la machine à vapeur, engagea CARNOT à rechercher si cette force était limitée par certaines conditions, et si elle était indépendante des corps dont on utilisait, en vue de la production du travail, les modifications auxquelles elle donne lieu. Dès le début de son travail, CARNOT fait une remarque qui met en lumière, d'une façon neuve et frappante, l'essence du phénomène au moyen duquel la force motrice est produite dans les machines à vapeur, en le dégageant de tous les caractères particuliers que peut présenter la disposition de la machine. Dans celle-ci, c'est l'air chaud du foyer qui transmet sa chaleur à l'eau de la chaudière et la transforme en vapeur; cette dernière se dilate dans le cylindre en repoussant le piston, et développe ainsi de la force motrice, ou produit du travail. Après s'être détendue, la vapeur pénètre dans l'espace froid du condenseur, s'y précipite en gouttes liquides et cède sa chaleur au condenseur. Or, d'après CARNOT, l'essence même du phénomène consiste dans le transport du calorique de la chaudière au condenseur. De même que, dans une roue hydraulique, la chute de l'eau du bief d'amont au bief d'aval est une source de force motrice, de même, dans la machine à vapeur, la force motrice est engendrée par la chute du calorique d'un corps d'une température élevée à un corps d'une température plus basse, d'une source supérieure de chaleur à une source inférieure. Si ces sources de chaleur, avec lesquelles la machine travaille, sont données, la bonté de la machine, son degré d'action seront déterminés par le rapport de la quantité de travail produite à la quantité de chaleur disponible. Ici se dresse une question d'une importance fondamentale. Pour le transport du calorique de la source supérieure à la source inférieure, nous pouvons faire usage de tous les corps possibles; le degré d'action de la machine dépend-il du corps qui sert au transport du calorique, ou bien reste-t-il le même quels que soient les corps employés? CARNOT résolut la question dans ce



dernier sens, et démontra ce théorème : La force motrice de la chaleur est indépendante de la nature des corps qui sont employés à la produire ; sa quantité est déterminée exclusivement par les températures des corps entre lesquels, en dernière analyse, s'effectue le transport de calorique. En outre, l'hypothèse de la nature matérielle de la chaleur le conduisit nécessairement à admettre que la quantité de calorique empruntée, par le corps qui travaille, à la source supérieure, devait être restituée complètement à la source inférieure.

» Le développement de ce théorème ne forme qu'une partie relativement faible du travail de CARNOT. La seconde partie, de beaucoup plus considérable, de ce travail a fait faire un premier pas, très important, dans le domaine des remarquables théories sur la chaleur spécifique et la chaleur latente qui constituent aujourd'hui un chapitre de la théorie mécanique de la chaleur.

» La théorie de CARNOT pénétra, comme un monument imposant, dans les temps modernes qui commencent avec la découverte des principes de l'équivalence de la chaleur et du travail. Sur le propre domaine du principe créé par CARNOT, la nouvelle doctrine, si fertile dans les branches les plus différentes de la physique, n'avait rien à lui opposer. Mais le fond de la théorie de CARNOT était détruit, après que la nature immatérielle de la chaleur eut été démontrée, et tout l'édifice semblait ainsi devoir s'écrouler. CLAUDIUS montra que cette crainte n'était pas fondée ; il reconnut les idées qu'il fallait conserver dans la théorie de CARNOT, et les fonda avec le nouveau principe dans un ensemble complet, une théorie de la chaleur qui apparaît dans le champ de la physique comme l'une des plus grandes conquêtes du siècle.

» Le Mémoire, dans lequel sont exposés les principes de la nouvelle théorie, fut présenté par CLAUDIUS à l'Académie de Berlin en février 1850. Il y fait voir que le théorème de CARNOT n'est nullement infirmé par la nouvelle manière

de voir, c'est-à-dire que, chaque fois qu'il y a production de travail par la chaleur, une certaine quantité de chaleur doit passer d'un corps chaud à un corps plus froid, d'une source supérieure de chaleur à une source inférieure. Par contre, l'hypothèse que la chaleur, reçue par le corps qui produit le travail, devait être restituée tout entière, n'était plus compatible avec le nouveau principe. Au contraire, toute la chaleur reçue devait se partager en deux parties : l'une est absorbée par le travail dans lequel elle se transforme d'après ce principe ; l'autre passe dans la source inférieure, lorsque le corps qui effectue le travail vient en contact avec elle. La quantité de chaleur reçue est plus grande que la quantité cédée de toute la valeur du travail produit. La façon dont CARNOT envisagea le processus n'eût été qu'un aperçu ingénieux, s'il n'y avait pas lié ce théorème que le degré d'action d'une machine ne dépend que des températures des deux sources de chaleur. *A priori*, il n'était pas improbable que ce théorème fût encore valable dans la nouvelle conception qu'on s'était faite de l'essence de la chaleur ; mais la voie suivie par CARNOT ne pouvait plus rendre de service dans la démonstration du théorème. CARNOT avait fondé celui-ci sur ce que le mouvement perpétuel est impossible, axiome qui sert aussi de base au principe de l'équivalence. CLAUSIUS fit voir, et c'est là le point fondamental de son Mémoire, que, pour démontrer le théorème, il est nécessaire d'introduire dans la théorie de la chaleur un principe nouveau, entièrement indépendant du précédent. Il érigea en principe ce fait, que la chaleur tend toujours à équilibrer les différences de température, à passer des corps plus chauds aux corps plus froids. Dès lors il semble tout naturel de se refuser à admettre que la chaleur passe d'elle-même, c'est-à-dire sans dépense de force ou sans quelque autre modification, d'un corps froid à un corps plus chaud. Et c'est de ce principe que CLAUSIUS déduisit par une voie indirecte le théorème de CARNOT.

» Si nous embrassons d'un coup d'œil la marche de la démonstration de CLAUDIUS, les difficultés du problème ne nous apparaissent que comme un jeu. Et en effet, pour nous qui avons été élevés dans les doctrines de la théorie mécanique de la chaleur, il n'est pas fort aisé de nous faire une idée exacte du travail intellectuel qui est caché dans le Mémoire de CLAUDIUS. Nous devons nous représenter que dans CARNOT et dans CLAPEYRON, qui a revêtu ses idées de la forme analytique, la vérité et l'erreur sont entremêlées de la manière la plus intime, et qu'il fallait une dose non commune de sagacité critique pour que ces travaux précurseurs n'apportassent pas autant de trouble que de clarté dans la question. Ce n'est qu'avec la persuasion intuitive des résultats nouveaux et fertiles produits, quoique avec une clarté vacillante, par la théorie de CARNOT, que CLAUDIUS pouvait entreprendre son travail de reconstruction, qui eût désespéré un esprit moins profond et moins pénétrant. »

Après cet exposé net et impartial, fait par un savant allemand distingué, de la découverte primordiale de CLAUDIUS, exposé si élogieux pour un illustre savant français, je reproduirai l'analyse que j'ai faite antérieurement des Mémoires sur la théorie mécanique de la chaleur, en suivant l'ordre dans lequel ils se sont succédé; on y retrouvera ainsi la genèse des idées de CLAUDIUS et l'histoire, pour ainsi dire, de la thermodynamique. Le lecteur peut se reposer avec confiance sur la fidélité de cette analyse, que CLAUDIUS m'a fait l'honneur de revoir lui-même.

La théorie mécanique de la chaleur, comme toutes les théories destinées à opérer dans une science une révolution complète, a eu des adversaires très décidés; et, comme ces dernières, elle a eu le sort de transformer en ses plus chauds partisans ceux-là mêmes qui l'avaient le plus ardemment combattue. Aujourd'hui, grâce à la concordance de ses résultats entre eux et avec les faits, elle est

généralement admise; et s'il est encore des gens qui doutent, du moins il n'en est plus qui la nient ouvertement. C'est à celui qui écrira l'histoire de cette science qu'il appartiendra de rechercher quels sont les savants à qui sont dus les principes sur lesquels elle repose. Nous voulons d'autant moins entreprendre ici cette tâche que CLAUSIUS a montré, dans tous ses travaux, la plus scrupuleuse impartialité, et la loyauté la plus grande vis-à-vis de ses compétiteurs.

Notre but est de mettre le lecteur au courant des principes essentiels de la théorie et des idées nouvelles que celle-ci a introduites dans la science, et de le familiariser ainsi avec des expressions qui se rencontreront fréquemment dans le cours de l'ouvrage. Nous trouverons en même temps l'occasion de nous expliquer sur les termes que nous avons adoptés pour traduire les dénominations nouvelles proposées par l'auteur.

Le premier principe fondamental de la théorie mécanique de la chaleur est que, dans tous les cas où la chaleur produit du travail, il se *consomme* une quantité de chaleur proportionnelle au travail produit; et réciproquement, que la *consommation* de ce travail peut produire la même quantité de chaleur.

Ainsi un corps reçoit du dehors une quantité de chaleur représentée par un certain nombre de calories; par son changement de volume, il effectue un travail; mais en même temps il a perdu de la chaleur; le rapport du travail produit à la chaleur perdue est constant; ce rapport s'appelle *équivalent mécanique de la chaleur*; il est approximativement égal à 424, si l'on prend le kilogrammètre pour unité de travail, et pour unité de chaleur la calorie; c'est-à-dire que la consommation d'une calorie peut produire un travail de 424 kilogrammètres. Réciproquement, si l'on effectue le même travail que précédemment en sens inverse, de manière à ramener le corps à l'état dans lequel il se trouvait avant d'effectuer ce travail, on reproduira la quantité de chaleur qui avait été perdue.

Il est bien entendu que, dans la quantité de chaleur perdue, nous ne comprenons pas celle que le corps a pu céder par conductibilité ou rayonnement, puisqu'elle n'a pas disparu ; et que, dans la quantité de travail équivalente à la chaleur perdue, nous devons faire entrer, outre le travail *extérieur* que le corps a effectué, et qu'on peut aisément mesurer, le travail *intérieur* nécessaire pour opérer le changement de volume, d'état ou de constitution ; ce dernier travail est beaucoup plus difficile à évaluer.

La quantité de chaleur que nous avons communiquée au corps s'est donc décomposée en trois parties :

La chaleur *consommée par le travail extérieur* que le corps a effectué ;

La chaleur *consommée par le travail intérieur* ;

Enfin l'accroissement de la *chaleur sensible* ou de la *chaleur réellement contenue* dans le corps, accroissement qui a déterminé l'élévation de sa température.

Il est à remarquer que les deux dernières quantités de chaleur ne dépendent absolument que de l'état initial et de l'état final du corps, et non de la manière dont il a passé d'un de ces états à l'autre. Parmi les différences qui peuvent se présenter à cet égard, nous mentionnerons d'abord celle qui provient de ce que *la voie des modifications* que le corps a subies pour arriver à son état final, peut varier d'une infinité de façons. Ainsi, pour choisir un exemple très simple, un gaz avait un volume  $v$  et une température  $t$  ; on peut l'amener au volume  $v' > v$  et à la température  $t' > t$  par différentes *séries de modifications* : soit en le dilatant simplement à la température constante  $t$  jusqu'à  $v'$ , et portant ensuite sa température à  $t'$  ; soit en l'amenant d'abord à la température  $t'$  sous le volume constant  $v$ , puis le dilatant jusqu'à  $v'$  à cette température constante  $t'$  ; soit en lui faisant subir des variations quelconques de volume et de température, par lesquelles il arrive finalement au volume  $v'$  et à la température  $t'$ . Dans tous les cas, la quan-

tité finale de chaleur consommée par le travail intérieur sera la même, ainsi que la quantité de chaleur contenue dans le corps; mais le travail extérieur et la chaleur qu'il consomme dépendent de la voie suivie par les modifications.

Afin de pouvoir leur appliquer le principe de l'équivalent mécanique de la chaleur, il faudrait pouvoir éliminer le travail intérieur à cause de la difficulté que présente son évaluation. Pour cela, il suffit que le corps subisse une série de modifications telles qu'il revienne finalement à son état initial, et que l'auteur a désignées sous le nom de *cycle fermé*.

Dans ce cas, la chaleur consommée par le travail intérieur et l'accroissement de la quantité de chaleur contenue dans le corps sont nuls; par suite, toute la quantité de chaleur reçue par le corps, pendant le cycle fermé, s'est transformée en un travail extérieur, et elle est proportionnelle à la quantité de travail produite. L'expression de ce principe pour des variations infiniment petites conduit à une équation différentielle entre la quantité de chaleur, le volume et la température; cette équation contient une fonction inconnue de ces deux dernières variables.

L'auteur la détermine pour le cas particulier des gaz qu'il appelle *gaz parfaits*, c'est-à-dire qui satisferaient exactement aux lois de MARIOTTE et de GAY-LUSSAC; il admet à cet effet l'hypothèse qu'un gaz parfait qui se dilate à température constante n'absorbe que la quantité de chaleur consommée par le travail extérieur qu'il effectue.

La fonction inconnue étant déterminée, dans le cas des gaz parfaits, par cette hypothèse, il s'agit encore d'intégrer l'équation différentielle dont il vient d'être question. Comme elle ne satisfait pas à la condition d'intégrabilité, il faudra, pour effectuer l'intégration, avoir entre les variables une seconde relation par laquelle la voie des modifications est déterminée. Au moyen de ce procédé, l'auteur arrive à des résultats dont nous ne mentionnerons

que le plus important, à savoir, que la différence des deux chaleurs spécifiques est constante pour chaque gaz, et que les deux chaleurs spécifiques elles-mêmes sont indépendantes de la pression et probablement aussi de la température ; résultat qu'il a étendu plus tard.

Pour d'autres corps que les gaz parfaits, la fonction de la température et du volume qui entre dans l'équation différentielle mentionnée reste inconnue. C'est en cherchant à déterminer d'une manière générale cette fonction que CLAUDIUS est arrivé au second principe fondamental de la théorie mécanique de la chaleur.

D'après les idées de S. CARNOT, lorsque la chaleur effectue un travail, elle passe d'un corps à un autre, mais sans qu'il s'en perde aucune quantité ; et le travail produit ne dépend que de la quantité de chaleur transmise d'un corps à l'autre, et non de la nature du corps intermédiaire. Rejetant la première partie du principe de CARNOT, qui est en contradiction avec la théorie mécanique de la chaleur, et conservant la seconde, qui est tout à fait indépendante de la première, CLAUDIUS pose en principe :

*A la production d'un travail correspond, outre une consommation de chaleur, une transmission de chaleur d'un corps chaud à un corps plus froid ; et le travail correspondant à une même transmission de chaleur ne dépend que de la quantité de chaleur transmise et des températures des deux corps entre lesquels s'effectue la transmission, et non de la nature de la substance intermédiaire.*

L'auteur déduit ce principe du suivant, qu'il pose en axiome :

*Il ne peut pas s'effectuer de transmission de chaleur d'un corps froid à un corps plus chaud, sans qu'il se produise simultanément une autre modification corrélative (telle par exemple qu'une transformation de travail en chaleur). Il énonce cet axiome plus brièvement sous la forme suivante :*

*La chaleur ne peut passer d'elle-même d'un corps froid à un corps plus chaud.*

Nous ne nous étendrons pas sur cet axiome, au sujet duquel l'auteur entre dans des développements qui font voir qu'il n'a pas la même signification que les axiomes tautologiques de la géométrie, et qui permettent d'en apprécier toute la portée.

De cet axiome se déduit avec la plus grande facilité le principe précédent, lorsque l'on considère un corps qui subit une série de modifications *réversibles*. L'auteur appelle ainsi des modifications que l'on peut effectuer également dans un sens ou en sens contraire.

Ainsi, lorsqu'un corps effectue un travail en surmontant des résistances égales à chaque instant à sa force expansive, on peut, au moyen de forces égales à ces résistances, vaincre la force expansive des corps; ou, du moins, cette égalité de la puissance et de la résistance est une limite qu'il est permis de considérer théoriquement; cette modification est réversible. De même une transmission de chaleur d'un corps à un autre, qui aurait à chaque instant la même température que le premier, est une modification réversible, qui est une limite du même genre que la précédente.

Au moyen du second principe fondamental, on obtient une nouvelle relation qui, jointe à celle que donne le premier principe, permet de déterminer la forme de la fonction inconnue, dont il a été question plus haut; les développements de calcul conduisent à une autre fonction qui est plus simple sous un double point de vue: d'abord c'est une fonction de la température seule, et en outre cette fonction ne varie pas d'un corps à un autre, mais elle est la même pour tous les corps. Il est très remarquable que ce résultat soit précisément celui auquel l'auteur avait été conduit par son hypothèse sur les gaz parfaits, à cela près que dans ce dernier cas la forme de la fonction est complètement déterminée par cette hypothèse.



Or, comme la fonction est indépendante de la nature du corps, la forme trouvée pour les gaz permanents s'applique également à tous les autres corps ; la fonction est donc complètement déterminée. Cette concordance entre les résultats de deux principes essentiellement différents est certainement un grand argument en faveur de l'exactitude de ces principes.

On trouvera de belles conséquences déduites de leur combinaison, et pleinement confirmées par les expériences, les plus récentes, relativement aux quantités de chaleur qu'absorbent ou émettent les gaz et les vapeurs dans les divers changements qu'on leur fait subir ; nous ne citerons que celle-ci, qui est de la plus haute importance et par sa nouveauté, et par la révolution qu'elle apporte dans la théorie des machines à vapeur : si l'on comprime de la vapeur saturée dans un vase impénétrable à la chaleur, elle ne reste pas saturée, mais peut céder une certaine quantité de chaleur sans se condenser. Si elle se dilate dans les mêmes circonstances, elle doit recevoir du dehors une certaine quantité de chaleur pour ne pas se condenser en partie.

Enfin l'équivalent mécanique de la chaleur est déterminé par deux méthodes différentes, reposant sur les équations relatives aux gaz et aux vapeurs ; et les résultats sont plus concordants qu'on n'oserait l'espérer, vu le peu de certitude des données expérimentales nécessaires.

Le second principe fondamental de la théorie mécanique de la chaleur peut se mettre sous une autre forme, et conduit à des lois de la plus grande généralité touchant les modifications que peut subir un système de corps.

Pour nous faire une idée claire de cette forme nouvelle, imaginons qu'un gaz permanent subisse une série de modifications formant un cycle fermé réversible.

Le gaz sera revenu à son état initial, et les modifications auront eu pour résultat :

1° De transmettre une quantité de chaleur  $Q_1$ , d'un

corps à la température  $t_1$ , à un autre corps à la température  $t_1 < t_2$ ; et

2° De transformer en travail une quantité de chaleur  $Q$  fournie par un corps de température  $t$ .

Or, en se fondant sur l'axiome énoncé plus haut, il est aisé de démontrer que ces deux quantités de chaleur sont entre elles dans un rapport constant; c'est-à-dire que si, au moyen d'un autre cycle fermé, on transformait la même quantité de chaleur en travail, il s'effectuerait la même transmission de chaleur, entre les deux corps de températures  $t_1$  et  $t_2$ .

Mais ce cycle, pouvant s'effectuer en sens inverse, aura dans ce cas pour résultat :

3° De transmettre la quantité de chaleur  $Q_1$ , du corps à la température  $t_2$  au corps à la température  $t_1$ ; et

4° De transformer le travail produit précédemment en la quantité de chaleur  $Q$ , qui peut être restituée à un corps de température  $t$ .

Nous pouvons donc dire que chaque cycle se compose de deux *transformations* simultanées :

- |                        |   |  |
|------------------------|---|--|
| 1 <sup>er</sup> CYCLE. | { | <p>1<sup>o</sup> Transformation d'une quantité de chaleur <math>Q_1</math>, à la température <math>t</math>, en la même quantité de chaleur à la température <math>t_2 &lt; t</math>.</p> <p>2<sup>o</sup> Transformation d'une quantité de chaleur <math>Q</math>, à la température <math>t</math>, en travail.</p>           |
| 2 <sup>o</sup> CYCLE.  | { | <p>3<sup>o</sup> Transformation de la quantité de chaleur <math>Q_1</math> à la température <math>t_2</math> en la même quantité de chaleur à la température <math>t_1 &gt; t_2</math>.</p> <p>4<sup>o</sup> Transformation du travail précédent en la quantité de chaleur <math>Q</math> à la température <math>t</math>.</p> |

Or, la première transformation étant donnée, on peut, au moyen du second cycle, l'*anéantir*, et la remplacer par la quatrième.

De même, la troisième peut être *anéantie* au moyen du premier cycle, et remplacée par la deuxième.

Ainsi la première et la quatrième transformation, la troisième et la deuxième, peuvent se remplacer mutuellement sans qu'il intervienne aucune autre modification permanente; ces transformations sont donc équivalentes entre elles.

Il s'agit de représenter mathématiquement ces transformations, de telle sorte que celles qui sont équivalentes aient la même valeur numérique; ces expressions mathématiques seront les *valeurs d'équivalence des transformations*.

Elles se déterminent aisément d'après les considérations qui précèdent, et conduisent à l'énoncé suivant du second principe, qu'on pourra nommer principe de l'équivalence des transformations :

*Si l'on appelle équivalentes deux transformations qui peuvent se remplacer mutuellement sans qu'il se produise aucune autre modification permanente, la production de la quantité de chaleur à la température  $t$  par du travail aura la valeur d'équivalence*

$$\frac{Q}{T};$$

*et le passage de la quantité de chaleur  $Q$  de la température  $t_1$  à la température  $t_2$ , la valeur d'équivalence*

$$Q \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right),$$

*$T$  désignant une fonction de  $t$  indépendante de la nature des modifications qui ont opéré la transformation.*

On voit immédiatement, par là, que cette seconde transformation a la même valeur d'équivalence que la double transformation de la même quantité de chaleur à la température  $t_1$  en travail, et d'une quantité de travail en cette quantité de chaleur à la température  $t_2$ .

Si l'on forme la *somme algébrique des valeurs d'équivalence de toutes les transformations*, ou, pour nous exprimer

plus brièvement, la *somme algébrique de toutes les transformations* qui surviennent dans un cycle fermé réversible, on trouvera que cette somme est nulle; pour un cycle fermé non réversible au contraire; cette somme ne peut être que positive. (On regarde comme positive une transformation de travail en chaleur, et, par suite, celle d'une quantité de chaleur à une certaine température en la même quantité de chaleur à une température plus basse; les transformations opposées seront négatives.)

La transformation nécessairement positive qui se présente à la fin d'un cycle fermé non réversible s'appelle *transformation non compensée*.

Une transformation non compensée ne peut donc être que positive.

On en a des exemples dans la conductibilité de la chaleur par simple contact, dans la production de la chaleur par le frottement ou par un courant électrique.

Ce principe fondamental de l'équivalence des transformations ne repose, comme on vient de le voir, que sur celui de l'équivalence de la chaleur et du travail, et sur l'axiome que la chaleur ne peut passer *d'elle-même* d'un corps froid à un corps plus chaud.

Établi sur deux bases aussi certaines, le principe de M. CLAUSIUS ne rencontrera pas de contradicteurs.

Mais, pour pouvoir l'appliquer, il reste encore à déterminer cette fonction  $T$  de la température: l'hypothèse sur les gaz permanents établit immédiatement que cette fonction est simplement la *température absolue* du corps, ou la température comptée à partir de  $-273^{\circ}$  C., qui est le *zéro absolu*.

Jusqu'ici la théorie se présente dégagée de toute hypothèse, à part la dernière, qui sert à déterminer la fonction  $T$ .

Nous arrivons maintenant à une exposition toute nouvelle, dans laquelle les résultats qui précèdent sont déduits d'une hypothèse unique extrêmement simple, et dont les

conséquences renversent plusieurs idées admises jusqu'à ce jour en physique.

Cette hypothèse, ou ce principe général, est le suivant :

*Dans tous les cas où la chaleur contenue dans un corps produit un travail mécanique en surmontant des résistances, la grandeur de celles qu'il peut vaincre est proportionnelle à sa température absolue.*

Ce principe est du reste confirmé par les faits autant que l'observation directe peut le permettre.

Or, lorsque la chaleur se transforme en travail par l'intermédiaire d'un corps, elle se décompose en trois parties :

La partie transformée en travail extérieur, qu'on peut déterminer par l'observation ; celle qui sert à accroître la quantité de chaleur réellement contenue dans le corps ; celle qui se transforme en travail intérieur, ou qui produit une *modification dans l'arrangement des molécules*.

Ces deux dernières ne sont pas accessibles à l'observation directe.

Afin de pouvoir représenter mathématiquement le travail total, c'est-à-dire la somme du travail intérieur et du travail extérieur, l'auteur introduit une quantité nouvelle qu'il appelle la *disgrégation*.

Le travail que la chaleur effectue dans un corps a pour résultat d'abord de diminuer la cohésion, ensuite, lorsque celle-ci est vaincue, d'augmenter l'écartement des molécules : ce double résultat constitue un accroissement de la *disgrégation*, de sorte qu'on peut dire que la chaleur a pour effet d'augmenter la disgrégation. Pour fixer cette quantité, on sait qu'à une température donnée l'accroissement de disgrégation et le travail correspondant sont proportionnels l'un à l'autre ; et que, de plus, quand un même accroissement de disgrégation s'effectue à des températures différentes, le travail correspondant est proportionnel à la température absolue ; et de là résulte la détermination de la disgrégation.

En appliquant le principe précédent à un cycle fermé réversible, pour lequel l'accroissement de la disgrégation est nul, on arrive à cette première conséquence, que *la quantité de chaleur réellement contenue dans un corps ne dépend que de sa température, et non de l'arrangement de ses parties constituantes*. Lorsque la température du corps augmente d'un degré, cette quantité de chaleur reçoit un accroissement nommé *vraie capacité calorifique*, et qu'il ne faut pas confondre avec la *chaleur spécifique* du corps, par laquelle on continue à représenter la quantité de chaleur qu'il faut lui communiquer pour élever sa température d'un degré ; cette dernière quantité comprend en effet, outre la précédente, celle qui a été transformée en travail intérieur, si l'on a maintenu le volume constant, en travail extérieur et intérieur à la fois, si l'on a maintenu la pression constante.

Or, puisque la quantité de chaleur réellement contenue dans un corps ne dépend que de sa température absolue, quel que soit du reste l'arrangement de ses parties constituantes, il en sera de même de sa *vraie capacité calorifique*. Clausius étend même cette loi aux composés chimiques, c'est-à-dire qu'il regarde la quantité de chaleur que renferme un composé comme étant égale à la somme des quantités de chaleur de ses composants à la même température.

Il y a plus : l'hypothèse relative aux gaz permanents conduit à admettre que la *vraie capacité calorifique* d'un gaz est constante, et les expériences les plus récentes donnent une grande probabilité à ce résultat. Il en est donc de même de celle de tout corps, à quelque état qu'il se trouve.

Telles sont les conséquences tout à fait neuves et réellement remarquables du principe général posé par l'auteur. Nous ne le suivrons pas dans les développements qu'il leur donne pour montrer que ce n'est qu'apparemment qu'elles sont en contradiction avec certains faits, et que ceux-ci

peuvent au contraire parfaitement concorder avec elles.

On verra déduire avec la plus grande facilité de ce principe unique les valeurs d'équivalence des trois transformations différentes qui peuvent s'effectuer pendant qu'un corps parcourt une série de modifications :

La transformation de la chaleur en travail, ou la transformation inverse ;

La transmission de chaleur entre deux corps de températures différentes ; et

Le changement de disgrégation.

Enfin, cette détermination conduit de nouveau aux principes exposés précédemment, relativement à la somme des transformations qui s'effectuent pendant la série des modifications que l'on fait éprouver à un corps.

Il nous reste encore à analyser quelques dénominations nouvelles employées par l'auteur, et dont le sens ne peut plus présenter la moindre obscurité, si l'on a compris ce qui précède.

On sait que la chaleur qui doit être communiquée à un corps pour lui faire éprouver une certaine modification se décompose en trois parties :

1° L'accroissement de la quantité de chaleur contenue dans ce corps ou du *contenu de chaleur* ;

2° La chaleur consommée par le travail intérieur ;

3° La chaleur consommée par le travail extérieur.

Les deux premières ne dépendent que de l'état initial et de l'état final du corps ; la somme de ces quantités, comptées à partir d'un état initial donné, est l'*énergie*.

Les quantités de chaleur sont exprimées en calories, tandis que les quantités de travail sont mesurées en kilogrammètres ; de sorte que l'on ne peut point ajouter simplement un travail à une quantité de chaleur, mais qu'il faut d'abord le réduire en son équivalent calorifique ; c'est ainsi que ci-dessus on n'a pas parlé simplement de travail, mais de la chaleur consommée par du travail.

Pour éviter cette difficulté et rapporter ces quantités à

une même unité, CLAUSIUS appelle *œuvre* le travail mesuré en calories, ou la valeur numérique du travail rapportée à une unité qui est la quantité de travail équivalente à une calorie.

Dans un état donné, un corps aura donc le *contenu de chaleur* et le *contenu d'œuvre*, dont la somme est l'*énergie*.

La quantité de chaleur introduite dans le corps n'a donc servi qu'en partie à accroître sa chaleur; le reste passe à l'état d'œuvre et s'appelle *chaleur d'œuvre*. C'est ainsi qu'on aura la *chaleur d'œuvre de vaporisation et de fusion*, qu'on pourra continuer à nommer simplement *chaleur de vaporisation et de fusion*.

Si l'on considère actuellement la *valeur de transformation du contenu de chaleur* du corps, ainsi que la *valeur de transformation de l'arrangement actuel de ses parties constituantes*, ou, ce qui revient au même, la valeur de la transformation d'œuvre en chaleur qui serait nécessaire pour anéantir l'accroissement de disgrégation, la somme de ces deux quantités pourrait s'appeler le *contenu de transformation*; l'auteur lui a donné le nom d'*entropie* qui rappelle celui d'énergie.

En résumé donc il y a six quantités déterminées par l'état actuel du corps :

1° Le contenu de chaleur; 2° le contenu d'œuvre; 3° leur somme ou l'énergie;

4° La valeur de transformation du contenu de chaleur; 5° la valeur de transformation de l'arrangement actuel des parties constituantes, ou la disgrégation; 6° leur somme ou l'entropie.

Si l'on applique à l'univers entier les deux principes fondamentaux de la théorie mécanique de la chaleur, on arrivera à ces deux lois remarquables par leur simplicité :

L'énergie de l'univers est constante;

L'entropie de l'univers tend vers un maximum.

Nous avons suivi autant que possible, dans cette ana-



lyse, les idées de l'auteur dans l'ordre même dans lequel il les a exposées. Pour éviter d'être trop long, nous avons dû passer sous silence bien des applications, malgré leur importance soit au point de vue de la confirmation des résultats théoriques par l'expérience, soit au point de vue de leur utilité. Nous ne mentionnerons ici, parmi les applications, que la théorie des machines à vapeur qui forme une partie importante de l'ouvrage, et que tout le monde lira avec le plus grand intérêt.

Nous n'avons pas parlé, et à dessein, des explications dont l'auteur accompagne souvent ses développements analytiques, ni de l'introduction mathématique par laquelle commence l'ouvrage. Un lecteur un peu familier avec la notion des différentielles partielles aura peine à comprendre que l'on ait pu critiquer la manière dont CLAUDIUS traite ses équations, et l'obliger ainsi à donner de grands développements à une question d'analyse que chacun aurait dû connaître avant d'aborder la lecture de ses travaux.

Tel est le résumé que nous avons donné des Mémoires contenus dans le tome premier de notre traduction ; nous y ajouterons celui des Mémoires que renferme le tome second.

L'application du principe de MAYER aux phénomènes électriques conduit à des résultats remarquables et complètement d'accord avec l'expérience, et elle sert souvent à donner la démonstration théorique de lois trouvées empiriquement, soit dans les effets dus à l'électricité statique, soit dans ceux qui sont produits par un courant stationnaire. En outre on trouvera, sur la formation du résidu dans la décharge, une théorie très intéressante qui peut s'appliquer également à deux hypothèses différentes sur l'état moléculaire de la couche isolante.

Passant aux phénomènes thermo-électriques, CLAUDIUS démontre que la chaleur elle-même doit intervenir dans la

production du courant, et que celui-ci ne peut pas s'expliquer par la seule hypothèse de la différence des actions exercées sur l'électricité par des substances chimiques différentes. Outre le principe de MAYER, CLAUSIUS a appliqué également à ces phénomènes le second principe fondamental de la théorie mécanique de la chaleur, auquel il a conservé le nom de CARNOT, malgré la modification essentielle qu'il a dû apporter au principe de ce savant, pour le mettre en harmonie avec le premier principe fondamental.

Les formules relatives aux conducteurs non électrolytiques sont applicables également aux conducteurs électrolytiques; mais il se présente ici une difficulté particulière relativement à la manière dont l'électricité se propage.

CLAUSIUS commence par prouver que les décompositions ne peuvent pas avoir lieu, comme on l'avait admis assez généralement, par simple voie de décompositions et de recombinaisons successives dans les différentes couches, de telle sorte, par exemple, qu'une *molécule totale* du liquide électrolytique étant séparée à l'*anode* en ses deux *molécules partielles*, l'anode retiendrait la molécule partielle négative, tandis que la positive décomposerait la molécule totale suivante et se recombinerait avec la molécule partielle négative de celle-ci, rendant ainsi libre la molécule partielle positive, qui agirait de même sur la molécule totale suivante, etc. Cette hypothèse en effet conduirait à cette conséquence qu'il existe un excès d'électricité positive *séparée*, ce qui est contradictoire avec la supposition d'un courant stationnaire.

De même, il est impossible que les molécules partielles soient combinées d'une manière stable en molécules totales, parce qu'alors la décomposition ne pourrait avoir lieu que du moment où l'intensité du courant serait devenue assez considérable pour pouvoir l'opérer, ce qui est en contradiction avec l'expérience.

L'hypothèse au moyen de laquelle CLAUDIUS a su éviter ces deux contradictions, consiste essentiellement dans une conception qui se trouve surtout développée dans les Mémoires relatifs aux mouvements moléculaires appelés chaleur.

D'après cette conception, les molécules d'un fluide n'oscilleraient pas, comme celles d'un solide, autour de positions d'équilibre déterminées, mais elles se mouvraient au contraire avec une grande rapidité dans tous les sens.

L'explication des phénomènes électrolytiques ne présente plus aucune contradiction au moyen de cette hypothèse.

Mais c'est surtout dans son application à la théorie des gaz qu'elle conduit aux résultats les plus remarquables.

Leurs propriétés physiques, ainsi que le phénomène de la vaporisation, s'expliquent par son moyen avec facilité. La pression n'est pas autre chose que la force vive de translation des molécules; la chaleur contenue dans le gaz est la force vive totale de tous les mouvements, et l'état gazeux consistant essentiellement dans ces mouvements rapides de molécules indépendantes, la chaleur n'a aucun travail intérieur à effectuer pour dilater un gaz, et ne sert qu'à accroître la quantité de chaleur qu'il contient, si son volume reste constant.

C'est cette idée qui avait conduit CLAUDIUS à affirmer, dans son premier Mémoire (1850), que la chaleur spécifique des gaz sous volume constant est constante, malgré des expériences qui semblaient contredire cette loi; elle a depuis lors, comme on sait, été vérifiée par REGNAULT.

Le rapport de la force vive de translation à la force vive totale, qui est 0,615 pour les gaz simples et les composés qui n'ont pas subi de diminution de volume par la combinaison, est plus faible pour les gaz composés qui ont subi une diminution de volume.

En recherchant la raison de cette particularité et des lois qui régissent les volumes des gaz, CLAUDIUS est arrivé

à se former l'idée que les molécules des gaz simples sont formées de plusieurs atomes. Ainsi, par exemple, il regarde les molécules de l'oxygène ordinaire libre comme formées de deux atomes combinés, l'un électro-positif, l'autre électro-négatif; ces deux atomes peuvent se séparer dans des conditions particulières, et constituent alors, les uns l'ozone, les autres l'antozone.

CLAUSIUS avait donc découvert théoriquement l'antozone avant que SCHÖNBEIN en établît expérimentalement l'existence.

Il nous paraît inutile de faire ressortir l'importance de ces idées sur la constitution moléculaire des corps, idées dans lesquelles réside l'avenir de la physique mathématique.

On trouvera une étude très générale sur la théorie des gaz, fondée sur les mêmes idées, et appliquée spécialement à la conductibilité des gaz pour la chaleur. L'importance de ce travail ne nous permettrait pas d'en donner un résumé assez succinct, et nous nous bornerons à le signaler tout spécialement à l'attention du lecteur.

A cette analyse des Mémoires de CLAUSIUS, il ne sera pas hors de propos de joindre l'appréciation de ses derniers travaux, empruntée, en majeure partie, à la notice déjà citée de M. ED. RIECKE.

Quoique CLAUSIUS n'ait pas fondé le premier la théorie cinétique des gaz, son nom n'en restera pas moins attaché à cette découverte, comme celui d'un des physiciens qui ont le plus contribué, avec MAXWELL, à l'établir et à la perfectionner. La première idée en revient à DANIEL BERNOULLI. Elle fut retrouvée par JOULE, KRÖNIG et CLAUSIUS. Ce dernier affirme (1) l'avoir eue dès 1850, et nul de ceux qui connaissent la haute valeur scientifique et morale du maître ne songera un instant à mettre cette affirmation en doute. Mais CLAUSIUS avait toujours eu pour principe de ne rien publier qui ne fût aussi parfait

(1) *Mémoire sur la nature du mouvement que nous nommons chaleur.*

que possible ; aussi, absorbé par des travaux beaucoup plus urgents sur le développement des principes fondamentaux de la théorie mécanique de la chaleur, n'aborda-t-il la théorie cinétique des gaz qu'après JOULE et KRÖNIG. La sienne cependant est de beaucoup supérieure à celle de ses devanciers.

C'est ainsi qu'il fit voir que les gaz ne suivent qu'approximativement les lois de MARIOTTE et de GAY-LUSSAC ; qu'ils renferment tous, à la même température et sous la même pression, le même nombre de molécules (loi d'AVOGADRO) ; que leurs molécules sont en général composées d'un nombre plus ou moins grand d'atomes, de sorte que la chaleur d'un gaz n'est pas représentée simplement par le mouvement linéaire de ses molécules, mais qu'il y faut joindre les vibrations des atomes de celles-ci ; que le rapport entre l'énergie du mouvement linéaire et l'énergie totale du gaz varie en raison inverse de la capacité calorifique rapportée à l'unité de volume.

C'est dans cet ordre d'idées que CLAUDIUS, attentif aux recherches des chimistes sur les différents états de l'oxygène, étudia l'ozone et émit l'opinion que sa molécule est formée de trois atomes d'oxygène, idée que les chimistes ont trouvée pleinement confirmée.

Dans un second Mémoire, CLAUDIUS aborde l'un des problèmes les plus profonds de la théorie moléculaire et le résout avec beaucoup de pénétration, au moyen d'une analyse fort simple, dans laquelle il a recours au calcul des probabilités pour déterminer la distance moyenne parcourue par les molécules ; il arrive ainsi à ce théorème remarquable, que cette distance est proportionnelle au diamètre des molécules multiplié par le rapport de l'espace qu'elles occupent en elles-mêmes à l'espace total occupé par le gaz, théorème grâce auquel on a été conduit plus tard à se faire une idée de la grandeur des molécules mêmes.

Celle-ci a confirmé l'affirmation de CLAUDIUS relative-

ment à l'extrême petitesse de la distance moyenne parcourue par les molécules. MAXWELL, se fondant sur la rapidité de leur mouvement, qui atteint des centaines de mètres par seconde, avait objecté que cette vitesse était en contradiction avec la lenteur que l'on observe fréquemment dans le mouvement de la fumée ; mais CLAUSIUS fit voir que le calcul de MAXWELL était entaché d'une erreur provenant d'une confusion d'unités ; ainsi, le physicien anglais avait trouvé que la conductibilité de l'air était 10 000 000 de fois plus faible que celle du cuivre, tandis que, d'après les calculs de CLAUSIUS, elle est seulement 1400 fois moindre que celle du plomb.

Cette démonstration rallia probablement MAXWELL à la théorie cinétique, et il devança même son prédécesseur dans l'étude du frottement, de la diffusion et de l'action mutuelle des molécules, dans la théorie de leurs chocs eu égard à ces circonstances, enfin, dans la découverte de la loi de la répartition de la vitesse entre les molécules.

La théorie cinétique des gaz, pour peu qu'on la généralisât, devait amener à se représenter la chaleur de tout corps comme la force vive de ses mouvements moléculaires ; et cette idée avait déjà été énoncée par CLAUSIUS et par d'autres physiciens. HELMHOLTZ avait montré que le principe de l'équivalence de la chaleur et du travail n'est, en ce sens, qu'une autre forme du principe plus général de la conservation de l'énergie. Mais le principe de CARNOT semblait beaucoup plus rebelle à une semblable déduction. Et cependant il devait, comme celui de MAYER, pouvoir se déduire de la théorie des mouvements moléculaires, si la chaleur n'était autre chose que le résultat de ces mouvements. Aussi les efforts des physiciens pour arriver à cette déduction furent-ils considérables. C'est BOLTZMANN à qui revient l'honneur de l'avoir trouvée le premier, dans la théorie des gaz. Sa démonstration, qui a paru dans les Mémoires de l'Académie de Vienne, en 1866, était ignorée de CLAUSIUS, lorsque celui-ci réso-

lut la même question d'une manière assez analogue, mais par une analyse plus simple et plus générale, et en précisant bien les hypothèses nécessaires à la démonstration.

Il considère un système de molécules qui décrivent des courbes fermées, et qui sont soumises à leurs actions mutuelles et à des forces extérieures. L'ensemble des molécules peut se partager en différents groupes, tels que dans chacun d'eux les orbites et les vitesses des molécules soient les mêmes, tandis que les phases seules sont différentes. Or, si cette décomposition du système en différents groupes se présente, on doit admettre de plus que les forces vives moyennes des molécules des différents groupes sont entre elles dans un rapport invariable. L'état du système vient-il à être modifié par l'introduction d'une certaine quantité de chaleur, les molécules se mouvront avec une vitesse différente dans de nouvelles orbites, et leurs actions mutuelles peuvent également être modifiées dans une certaine mesure. La quantité de chaleur introduite est alors, en vertu du premier principe, égale à l'accroissement de force vive augmenté du travail dépensé dans le transport des molécules aux points initiaux de leurs nouvelles orbites.

CLAUDIUS fait voir que cette quantité de chaleur peut être représentée par le produit de deux facteurs. Le premier est proportionnel à la force vive moyenne des molécules, le second est l'accroissement subi par une quantité qui dépend des masses, des vitesses et des durées de révolution des molécules, et qui est, par suite, complètement déterminée par l'état actuel du système. Si l'on identifie le premier facteur avec la température absolue, le second avec l'entropie, on obtient le second principe sous la dernière forme que CLAUDIUS lui a donnée.

C'est dans les recherches qu'il a faites à l'occasion de cette démonstration que CLAUDIUS a été conduit à l'idée du *viriel*, si importante dans l'étude des mouvements stationnaires. Le viriel d'un couple de points est la moyenne

des produits formés en multipliant l'action qu'ils exercent entre eux, pendant chacun des instants dans lesquels on partage l'unité de temps, par leur demi-distance à chacun de ces instants ; il est égal, comme le démontre CLAUSIUS, à la force vive moyenne du couple de points.

Dans l'application de ce théorème aux forces centrales, notre auteur arrive à des conséquences remarquables, et fait voir, entre autres, que la troisième loi de KEPLER s'en déduit comme cas particulier.

C'est au sujet d'une objection faite par RANKINE au second principe, objection sur laquelle nous reviendrons, que CLAUSIUS écrivit son Mémoire sur la concentration des rayons de chaleur et de lumière.

Il s'est occupé également de l'étude des différents phénomènes lumineux que les rayons solaires produisent dans l'atmosphère, mais ces derniers travaux n'ont pas été insérés dans la collection de ses Mémoires.

D'autres, plus considérables, font partie de celle-ci : ce sont les études qu'il a consacrées à la théorie de l'électricité, qu'il examina d'abord dans ses rapports immédiats avec la théorie de la chaleur, mais ensuite en elle-même également, témoin sa théorie du condenseur, sa démonstration de la loi de WEBER, etc.

C'est à WEBER que revient l'honneur d'avoir formulé le premier, d'une manière complète, la loi qui régit les phénomènes électriques. D'après cette loi, la force qu'exercent l'un sur l'autre deux points électrisés ne dépend pas seulement de la distance de ces deux points, mais encore de la vitesse avec laquelle ils se rapprochent ou s'éloignent l'un de l'autre. RIEMANN avait cherché à expliquer ce résultat remarquable par l'hypothèse que la force exercée par une particule électrique sur une autre n'agit pas intantanément, d'après leur distance réciproque, mais qu'elle parcourt avec une vitesse finie, celle de la lumière, l'intervalle compris entre les deux particules. Le Mémoire de RIEMANN, qui ne parut qu'après sa mort, en



1867, fournit à CLAUDIUS l'occasion d'aborder le domaine de l'électrodynamique. Il fit voir que le calcul de RIEMANN renfermait une erreur qui infirmait complètement le résultat de sa recherche. C. NEUMANN, qui a repris celle-ci en 1868, a toutefois démontré l'exactitude de l'idée de RIEMANN.

A cette époque, la théorie de WEBER était universellement admise en Allemagne ; elle était la seule qui appliquât, d'une manière conséquente, une loi unique à tous les phénomènes électriques. En Angleterre cependant, W. THOMSON et MAXWELL, se rangeant aux idées de FARADAY, avaient conçu les actions électriques d'une façon toute différente, dont l'importance fut confirmée par le grand nombre de relations nouvelles qu'elle fournit dans le domaine théorique comme dans le domaine expérimental. Ces études, trop peu connues en Allemagne, y étaient restées sans influence jusqu'à ce que HELMHOLTZ, dans un Mémoire fondamental publié en 1870, embrassât dans un seul ensemble le résultat des deux manières de voir différentes, et jetât un pont entre elles. Ce Mémoire produisit une impulsion puissante ; il réveilla les recherches en électrodynamique, tant au point de vue de la critique des théories antérieures qu'à celui des tentatives d'une solution nouvelle. CLAUDIUS prit bientôt aussi une part très importante à l'étude des questions essentielles qui s'étaient posées sur le domaine de l'électrodynamique. Ce fut sur un point de la théorie de WEBER, qui avait déjà été contesté, que CLAUDIUS porta tout d'abord son attention. WEBER admet que, dans un courant galvanique, les deux électricités se meuvent en sens contraire avec la même vitesse. A cette hypothèse compliquée, on avait déjà tenté d'en substituer une plus simple, consistant à admettre qu'une seule des deux électricités se meut, tandis que l'autre reste en repos. Mais il en résultait des conséquences qui étaient en contradiction avec l'expérience ; en effet, un courant galvanique devait alors exercer, indé-

pendamment des actions électrodynamiques, des effets possédant le caractère d'attractions et de répulsions électrostatiques, effets qui n'ont jamais été observés.

Prenant pour point de départ un fait d'expérience très général, CLAUSIUS chercha à déterminer l'action mutuelle des particules électriques de telle sorte, qu'en admettant l'hypothèse d'un courant unique, les conséquences de cette hypothèse qui étaient contraires à l'expérience fussent tout d'abord exclues. Il vit que cela n'était possible que si l'on admettait en outre que l'action mutuelle de deux particules électriques ne dépend que de leurs vitesses absolues dans l'espace, et non de la vitesse relative dans la direction de leur ligne de jonction.

Les conséquences qui se déduisent de la loi de CLAUSIUS, et en particulier les lois élémentaires des actions électrodynamiques, concordent avec l'expérience, pour autant que celle-ci se rapporte aux actions des courants fermés. Néanmoins on ne peut s'empêcher d'élever quelques objections contre la théorie de CLAUSIUS. La dépendance entre la force et la vitesse absolue ne peut être mise en harmonie avec les principes, bien certainement incontestables, de la mécanique, que si l'on admet que l'action mutuelle des particules électriques n'est pas immédiate, mais s'opère par un milieu qui remplit l'espace intermédiaire ; l'absolue indétermination de ce milieu, l'absence de toute notion sur les phénomènes et les propriétés au moyen desquels il concourt à rendre possible l'action mutuelle des particules, constituent une lacune qui ne permet pas d'admettre comme très satisfaisant le résultat des recherches de CLAUSIUS.

Si l'introduction du milieu intermédiaire rend compte de cette circonstance que, comme le veut la loi de CLAUSIUS, le principe de l'égalité de l'action et de la réaction n'est pas applicable à l'action mutuelle de deux particules électriques, la question n'en reste pas moins ouverte de savoir jusqu'à quel point le principe de la conservation de

l'énergie peut s'appliquer aux deux particules seulement, abstraction faite du milieu intermédiaire.

Malgré tous les efforts qui ont été tentés pendant les dix dernières années, nous ne sommes pas encore arrivés à acquérir de notions certaines sur la nature des actions électriques, et il n'est pas improbable que les difficultés du problème ne pourront être levées que par de nouveaux faits expérimentaux. Lorsqu'une heureuse découverte aura déchiré le voile, on verra ressortir clairement la véritable importance des travaux antérieurs, et la signification des idées qui leur servent de base ; et c'est alors seulement qu'il sera possible d'assigner aux recherches de CLAUDIUS sur l'électrodynamique leur place définitive dans le développement de la science.

De 1870 à 1880, c'est surtout vers l'étude des questions théoriques que se portait l'activité dans le domaine de l'électrodynamique ; les années suivantes se distinguent par l'essor inattendu que prirent les applications techniques de l'électricité. De même que CLAUDIUS soumit auparavant à une recherche approfondie la théorie de la machine à vapeur, de même, il traita alors, d'une manière complète et exacte, du moteur puissant de l'électricité, la machine dynamo-électrique. La constance avec laquelle il approfondissait les problèmes les plus difficiles n'avait pas obscurci la clarté de ses vues sur les services rendus par les praticiens ; et, dans sa partie, il chercha à fortifier les rapports stimulants et fertiles du travail scientifique et de l'activité individuelle. Au Congrès des électriciens, qui se réunit en 1881 à Paris sous l'inspiration de savants animés du même esprit, CLAUDIUS fut un des délégués de l'empire allemand, et j'ai eu l'occasion de voir combien il y était apprécié des physiciens les plus éminents. Il fut, à cette occasion, nommé officier de la Légion d'honneur, et en éprouva une vive satisfaction. Les délibérations de ce Congrès furent l'occasion de ses recherches sur les rapports qui existent entre l'électricité et le

magnétisme, ainsi que sur les systèmes de mesures absolues et pratiques applicables dans ces deux domaines.

Le dernier discours rectoral qu'il a prononcé à l'Université de Bonn traite encore de son sujet favori ; il est intitulé : *Des provisions d'énergie de la nature*. CLAUDIUS y préconise l'utilisation, au moyen du transport électrique de la force, du travail des chutes d'eau si abondamment répandues dans les pays montagneux.

Nous qui avons assisté à l'éclosion du principe de l'unité des forces physiques et de leur transformation les unes dans les autres, qui avons été les premiers témoins de l'utilisation, grâce à l'électricité, de forces naturelles qui semblaient auparavant perdues pour l'activité industrielle, nous ne pouvons nous dispenser, peut-être au point de vue poétique, de jeter un regard de regret sur les temps qui nous ont immédiatement précédés, où nul ne songeait à s'emparer des cascades qui animent les sites agrestes, pour transporter au loin leur force transformée en électricité. Mais, à tout prendre, ne vaut-il pas mieux les faire servir à un but utile que de les enfermer dans des cages d'où l'on ne peut plus les contempler que moyennant finances, à travers des vitres de couleur ?

Il nous reste à développer la conséquence métaphysique que W. THOMSON, après sa conversion au second principe de la Théorie mécanique de la chaleur, a déduite de celui-ci, relativement à l'état futur de l'univers, et à faire voir que, de cette conséquence même, il résulte une démonstration physique de la Création.

L'importance du sujet nous engage à le traiter d'une manière détaillée.

Nous analyserons donc à nouveau brièvement les deux principes fondamentaux de la Théorie mécanique de la chaleur, et nous les appliquerons à l'ensemble de l'univers, en donnant au second la forme dernière dont l'a revêtu CLAUDIUS.

## DÉMONSTRATION PHYSIQUE DE LA CRÉATION.

Jusque vers le milieu de ce siècle on avait en mécanique des idées bien fausses encore sur certaines communications de mouvement ; ainsi, tandis qu'on démontrait qu'il n'y a aucune perte de force vive dans le choc de deux corps élastiques, on affirmait sans sourciller qu'il y a perte dans le choc de deux corps durs, et l'on ne cherchait à cette perte aucune espèce de compensation ; de même, on croyait que des forces peuvent s'entre-détruire, sans soupçonner que ce principe, s'il était vrai, devrait fatalement amener la destruction de toute force dans l'univers, puisque, d'après lui, la quantité de force pourrait décroître, tandis qu'aucune combinaison possible ne pourrait l'augmenter, de sorte qu'une force une fois détruite serait perdue à jamais.

La chimie avait, dès le commencement de ce siècle, posé en principe que les atomes matériels sont indestructibles ; la mécanique n'avait pas encore soupçonné le même principe relativement à la force. Et cependant, s'il existe deux idées essentiellement corrélatives, ce sont celles de matière et de force dans la nature physique, à tel point que l'une ne peut se concevoir sans l'autre, et qu'il est même indifférent de dire : la force, c'est de la matière en mouvement, ou : la matière, c'est la manifestation de la force ; au fond de ces deux notions il n'y a peut-être qu'une substance unique, qu'on l'appelle matière ou qu'on l'appelle force, peu importe. Mais il ne fallait rien moins que les brillantes découvertes de notre siècle pour ramener toutes les sciences à cette unité que les philosophes avaient entrevue.

Déjà, au siècle dernier, Bacon, Locke, Rumford, Davy, avaient exprimé nettement l'idée que la chaleur n'est autre chose qu'un mouvement des particules des corps, et non un fluide propre. Montgolfier, au dire de Marc Seguin, son

neveu, exprimait, en 1800, et cette idée et celle de l'impossibilité de l'annihilation de la force. Ce n'est qu'en 1842 toutefois que le véritable principe de l'équivalence de la chaleur et du travail est nettement formulé par J. R. Mayer, médecin à Heilbronn (Wurtemberg), qui y est arrivé par la seule puissance de son génie, sans être encouragé par aucun savant, et sans y avoir été amené par des études spéciales de physique ou de mécanique ; son premier travail, qui a paru dans un journal de pharmacie, a même été ignoré d'abord de la plupart des physiciens. Vers la même époque, et sans rien connaître de ce travail, Joule faisait à Manchester des expériences, dans le but de déterminer la relation qui a lieu entre le travail produit et la chaleur consommée dans cette production, ou entre le travail consommé et la chaleur produite par cette consommation ; et ses résultats concordaient admirablement avec celui que Mayer avait trouvé théoriquement.

Indépendamment de ces deux savants, Deprez à Paris, Holtzmann à Mannheim, Colding à Copenhague, Helmholtz, l'éminent physiologiste et physicien, se livraient à de profondes recherches dans la même direction, et ce dernier ramenait tous les phénomènes naturels à un principe unique dans son bel ouvrage sur la conservation de la force.

Bientôt après, des hommes illustres, Clausius en Allemagne, Rankine, W. Thomson et Maxwell en Angleterre, élargirent considérablement le champ des applications de la nouvelle théorie à l'aide de ce puissant moyen d'investigation qu'on appelle l'analyse mathématique, et se disputèrent l'honneur de découvertes importantes, dont la vérification expérimentale devait décider de l'acceptation ou du rejet de la théorie ; les belles recherches des deux expérimentateurs les plus habiles de l'époque, Regnault et Magnus, vinrent confirmer ces découvertes, et dès lors la théorie ne rencontra plus de contradicteurs ; l'un même d'entre ceux qui l'avaient le plus ardemment combattue,

Hirn, de Colmar, fut amené à en reconnaître l'exactitude par l'étude même des faits qui devaient lui servir à la renverser.

Clausius, par son hypothèse, aujourd'hui bien établie, sur la nature des gaz, prouva l'existence d'un zéro absolu de température, qui ne peut jamais être atteint par aucun corps. quelle que soit la quantité de chaleur qu'on lui enlève par les moyens les plus énergiques ; et il détermina la position de ce zéro absolu à  $273^{\circ}$  C. au-dessous de la température de la glace fondante ; il eut avec Rankine, l'honneur de fonder les véritables principes de la théorie des vapeurs ; avec Thomson, celui d'étendre les applications de la théorie aux phénomènes électriques ; enfin il eut seul, et ce sera l'un de ses plus grands titres à l'admiration de la postérité, la gloire d'avoir posé, à côté du principe de Mayer, celui de Carnot comme second principe fondamental de la théorie mécanique de la chaleur, ce qui était d'autant plus malaisé à cette époque, que Carnot regardait la consommation de chaleur comme nulle dans le travail ; en reprenant l'idée de Carnot, Clausius devait donc la débarrasser de l'erreur capitale dont elle était entachée, et remettre son principe en harmonie avec celui de Mayer ; aussi a-t-il d'abord soulevé une vraie tempête de contradictions, de la part même des physiciens les plus éminents, ce qui prouve combien il fallait de génie pour découvrir et la nécessité de ce principe, et son harmonie avec le premier.

Ces deux principes fondamentaux, appliqués à l'ensemble de l'univers matériel, conduisent à deux conséquences d'une haute portée métaphysique : la première, énoncée presque en même temps par Mayer et Helmholtz, c'est que l'énergie totale de l'univers, c'est-à-dire la somme des travaux de toutes les forces naturelles et des forces vives de tous les mouvements, tant des corps que des molécules, est constante ; la seconde, déduite par W. Thomson du principe de Clausius, c'est que l'ensemble de l'univers

tend de plus en plus vers un état final, dans lequel tous les mouvements des corps se seront convertis en mouvements moléculaires, de sorte que l'univers se trouvera réduit à un espace sans vie, dont le vide sera rempli exclusivement de molécules effectuant ces oscillations rapides qui constituent le calorique, et conservant intacte toute l'énergie dont cet univers était animé à son origine, mais sans possibilité intrinsèque d'aucune transformation ultérieure.

Avant d'aborder le premier principe, je rappellerai une loi connue depuis longtemps en mécanique, et dont les géomètres anciens, comme notre S. Stevin, avaient souvent fait usage dans leurs démonstrations sous cette forme que le mouvement perpétuel est impossible; cette loi consiste en ce que, quelle que soit la machine dont on fasse usage, il est impossible d'en retirer un travail plus grand que celui de la force qu'on a fait agir. On peut donc transformer un travail en un autre équivalent; ainsi on peut transformer le travail musculaire, ou celui d'un cours d'eau, ou celui du vent, par l'intermédiaire de différents mécanismes, en mille autres travaux, tels que l'élévation ou le transport des fardeaux, le broiement, le percement, l'étirage, le laminage des substances que l'on veut mettre en œuvre; mais la quantité de travail produite ne sera jamais que l'équivalent du travail dépensé. Pour donner à cette loi toute la généralité dont elle est susceptible, il faut comprendre sous le nom de *travail* la force vive que l'on communique à certaines masses au moyen du travail d'une force donnée; on sait, en effet, que le travail d'une force qui agit sur un corps libre est égal à la force vive qu'elle lui imprime; ainsi, par exemple, si je veux puiser à 20 mètres de profondeur un litre d'eau par seconde et le lancer avec une vitesse de 10 mètres, je devrai disposer d'une force capable en une seconde d'un travail équivalent à l'élévation du poids de ce litre d'eau à 20 mètres de hauteur et à la force vive de cette même



masse d'eau lancée avec une vitesse de 10 mètres. Un travail peut donc se convertir soit en un autre travail, soit en force vive; réciproquement une force vive peut se convertir soit en une autre force vive, soit en travail, de telle sorte qu'il y ait toujours équivalence entre l'effet produit et la cause productrice. Celui-là donc qui, se disant que la chaleur n'est que la force vive d'un mouvement des particules des corps, aurait appliqué le principe général de l'équivalence de la force vive et du travail, celui-là aurait trouvé par cela même l'équivalent mécanique de la chaleur, c'est-à-dire la quantité de travail dans laquelle peut se transformer une quantité donnée de chaleur.

Comme on l'a vu, c'est Mayer qui a le premier posé ce grand principe, et, avec le coup d'œil du génie, il a indiqué immédiatement le moyen de déterminer théoriquement l'équivalent cherché. En comparant la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter, d'un certain nombre de degrés, la température d'un gaz sous volume constant, à celle qui est nécessaire pour l'élever d'autant sous pression constante, et qui est plus considérable que la première, Mayer en a conclu que cet excédent de chaleur s'est transformé dans le travail que le gaz a effectué en se dilatant, et il a déduit de là, par un calcul très simple, que l'équivalent mécanique de la chaleur, c'est-à-dire le travail équivalent à une unité de chaleur, est égal à 424 kilogrammètres (1).

Ce résultat, obtenu sans recourir directement à l'expérience, concorde admirablement avec ceux que Joule a déduits d'un nombre très considérable de mesures tout à fait directes, en employant soit le travail de la chute d'un corps, soit celui du frottement à produire de la chaleur.

On objectera peut-être à la détermination précédente, qu'il n'a pas été tenu compte du travail intérieur néces-

(1) Au lieu du nombre 424, Mayer avait trouvé 370 seulement, à cause de l'inexactitude des données expérimentales dont il avait fait usage. En se servant des plus récentes, on arrive au nombre que nous avons indiqué.

saire pour augmenter le volume du gaz. Mayer s'était contenté de regarder ce travail comme très faible et, par suite, comme négligeable. Clausius, le premier, prenant pour base les idées qu'il a développées depuis sur la nature du mouvement moléculaire que nous nommons chaleur, a affirmé nettement que ce travail n'est pas seulement négligeable, mais qu'il est rigoureusement nul, du moins pour les gaz parfaits, c'est-à-dire pour ceux qui suivraient exactement les lois de Mariotte et de Gay-Lussac ; et les expériences postérieures de Regnault sont venues confirmer cette idée ; l'objection disparaît par suite complètement.

Sans doute, s'il s'agissait de produire du travail par la dilatation d'un solide ou d'un liquide, ce travail intérieur, nécessaire pour effectuer la dilatation, abstraction faite des résistances extérieures qui sont à vaincre, ne pourrait pas être négligé ; mais je dois me borner à dire ici que, dans ce cas encore, la théorie a été admirablement confirmée par les expériences les plus précises, et a servi même à corriger des expériences antérieures, qui ont été en effet trouvées défectueuses.

Ce n'est pas le lieu d'aborder mathématiquement la démonstration du second principe fondamental, qui est du reste plus difficile à bien saisir que le premier ; et au lieu de lui donner la forme abstraite qu'il revêt dans son expression analytique, je préfère exposer la manière dont Clausius l'a développé postérieurement dans différents travaux, et dont il s'est servi lorsqu'il a pris ce second principe pour sujet d'une lecture faite à l'assemblée des naturalistes allemands à Francfort-sur-Mein en 1867.

La chaleur manifeste une tendance universelle à s'équilibrer entre les différents corps par rayonnement ou par conductibilité, c'est-à-dire qu'elle passe d'elle-même d'un corps chaud à un corps froid, sans qu'il soit nécessaire qu'aucune autre modification se présente simultanément. Cette tendance est tellement inhérente à la nature même

de la chaleur, que Clausius a fondé la démonstration de son principe sur ce postulat que la chaleur ne peut passer *d'elle-même* d'un corps froid à un corps chaud. Lorsque la chaleur pénètre un corps, elle a pour effet d'augmenter la distance entre ses molécules, soit en le dilatant, soit en le liquéfiant ou le vaporisant, et même parfois de dissocier ses molécules, comme on le voit dans les décompositions chimiques qu'elle produit. Clausius a compris tous ces effets sous un nom générique en disant que la chaleur tend à augmenter la *disgrégation* des corps.

Mais, pour augmenter la disgrégation d'un corps, la chaleur a, en général, deux travaux à effectuer : le premier intérieur, pour vaincre la cohésion des molécules, le second extérieur, pour vaincre les pressions auxquelles le corps est soumis. Dans ces deux cas, comme nous le savons en vertu du principe de Mayer, la chaleur qui a effectué le travail disparaît et se trouve remplacée par une quantité de travail équivalente.

Le travail intérieur est généralement fort difficile à évaluer ; mais on peut éviter cette difficulté de deux manières : soit en opérant sur un gaz parfait, dans lequel le travail intérieur est nul, comme nous l'avons vu, soit en opérant sur un autre corps de façon à le ramener finalement dans son état initial, ce qui fait que la somme algébrique des travaux intérieurs qui auront été effectués sera nulle ; une telle série d'opérations s'appelle un cycle fermé.

Pour l'uniformité de la terminologie, nous donnerons le nom général de transformations à tous les effets de la chaleur que nous venons d'énumérer. Ainsi, lorsqu'un corps à la température de  $30^{\circ}$  cède une certaine quantité de chaleur à un corps à  $0^{\circ}$  ou *vice versa*, nous dirons qu'il y a eu une transformation de cette quantité de chaleur à  $30^{\circ}$  en la même quantité de chaleur à  $0^{\circ}$  ou *vice versa*. De même, lorsqu'un corps aura subi un accroissement ou une diminution de disgrégation, nous dirons qu'il s'est effectué

une transformation de la disgrégation. Et enfin, lorsqu'une certaine quantité de chaleur aura été convertie en une quantité de travail équivalente, ou produite par la consommation de cette quantité de travail, nous dirons qu'il y a eu transformation de chaleur en travail ou *vice versa*. Le principe de Clausius exprime une relation entre les valeurs numériques des transformations qui s'effectuent dans une série d'opérations que l'on fait subir à un corps donné.

Le cas le plus simple à examiner est celui où cette série d'opérations est réversible, c'est-à-dire peut s'effectuer également en sens inverse. Pour que cette condition soit remplie, il faut : 1° que le corps considéré soit soumis à une pression normale égale à chaque instant à sa force expansive, car alors il pourra se dilater malgré cette pression ou se comprimer sous l'influence de cette même pression; 2° que le corps considéré soit toujours à la même température que ceux avec lesquels il effectue des échanges de chaleur, afin que la chaleur puisse passer indifféremment du premier aux autres et *vice versa*.

On voit, par ces conditions mêmes, que les cycles réversibles ne peuvent pas se réaliser dans la nature, et ne sont qu'une limite qu'il nous est permis d'envisager théoriquement.

Bornons-nous donc aux opérations réversibles, et cherchons à évaluer en nombres les transformations que nous venons d'énumérer.

Nous conviendrons que deux transformations sont équivalentes, lorsque l'une d'elles peut être anéantie et remplacée par l'autre au moyen d'un cycle d'opérations réversibles. Ainsi, je suppose une certaine masse de gaz qui s'est dilatée au double de son volume primitif; voilà une transformation de disgrégation du gaz; je puis anéantir cette transformation en comprimant le gaz jusqu'à le réduire à son volume primitif; mais alors je transforme une certaine quantité de travail en chaleur; cette dernière

transformation, ayant remplacé celle de la disgrégation, est regardée comme son équivalente.

Mais il faut bien remarquer que la valeur de cette transformation n'est pas le nombre des unités de chaleur produites par le travail ; non, ce que nous avons à déterminer, c'est la valeur numérique que nous devons attribuer à cette transformation elle-même pour que cette valeur soit égale à celle de la transformation de disgrégation qui lui est équivalente. Ici donc ce n'est plus une certaine quantité de chaleur qui est prise pour unité ; c'est une certaine transformation déterminée, celle, par exemple, qui se présente dans la disgrégation d'une masse donnée d'un gaz parfait qui double de volume d'une manière réversible.

Après avoir indiqué comment nous mesurerons les transformations, nous avons encore une convention à faire quant à leurs signes ; nous regarderons un accroissement de disgrégation comme une transformation positive ; il en sera naturellement de même de la transformation équivalente que nous venons de mentionner du travail en chaleur. Les deux transformations opposées seront négatives ; et quant au signe de la transformation d'une quantité de chaleur à une température donnée en chaleur à une autre température, il sera déterminé directement par la mesure de cette transformation au moyen des conventions précédentes.

Les trois espèces de transformations dont nous avons parlé vont se rencontrer dans le cycle fermé réversible que nous prendrons comme exemple.

Les températures seront indiquées en degrés centigrades, à la fois à partir du zéro ordinaire et du zéro absolu ( $-273^{\circ}$  C.).

Soit donné un volume de gaz à  $273^{\circ}$  centigrades (ou  $2 \times 273^{\circ}$  A) soumis à des opérations réversibles (1).

(1) La lettre A indique que les degrés sont comptés à partir du zéro absolu.

I. Au moyen de l'addition d'une certaine quantité de chaleur, laissons-le se dilater jusqu'au double de son volume primitif, en le maintenant constamment à la même température; sa disgrégation sera doublée, sa pression devenue moitié moindre, et il aura effectué un certain travail;

II. Abaissons sa température à  $0^{\circ}$  centigrade (ou  $273^{\circ}$  A) en faisant passer l'excédent de chaleur dans un réservoir; sa pression décroîtra encore de moitié, c'est-à-dire sera devenue le quart de la pression primitive;

III. Comprimons-le à cette même température constante de  $0^{\circ}$  centigrade jusqu'à le ramener au volume primitif, en sorte que sa pression sera doublée et redevenue la moitié de la pression première.

Cette compression exigera la consommation d'un certain travail, mais inférieur de moitié à celui qui a été produit précédemment, puisque les volumes sont les mêmes, tandis que les pressions sont de moitié moindres dans le travail actuel que dans le premier. Cette compression aura, en outre, produit une certaine quantité de chaleur à  $0^{\circ}$  centigrade que nous supposons reçue par un corps à cette température.

IV. Pour ramener notre gaz à son état initial, nous n'avons qu'à lui faire restituer par le réservoir la chaleur que celui-ci lui avait empruntée dans la deuxième opération. La température s'élève alors à  $273^{\circ}$  C., qui est sa température primitive, et, comme son volume reste constant, sa pression doublera, c'est-à-dire redeviendra la pression primitive.

La première opération a donné pour résultat les deux transformations suivantes: un accroissement de disgrégation du gaz du simple au double, et une transformation de chaleur en travail. Or, si nous effectuons celle-ci en sens inverse, c'est-à-dire, analytiquement, si nous la prenons en signe contraire, elle anéantira la transformation de disgrégation et la remplacera; il en résulte, d'après ce que

nous avons dit sur l'équivalence des transformations, que l'augmentation de disgrégation et la transformation simultanée de la chaleur en travail sont égales et de signes contraires, autrement dit que leur somme algébrique est nulle. La troisième opération a de même donné pour résultat les deux transformations suivantes : une diminution de disgrégation du gaz du double au simple, et une transformation de travail en chaleur. Cette dernière, effectuée en sens inverse, ou prise en signe contraire, anéantit la première et la remplace ; la diminution de disgrégation et la transformation simultanée de travail en chaleur sont donc égales et de signes contraires ; autrement dit leur somme algébrique est nulle.

Remarquons d'abord l'accord qui se présente quant aux signes des transformations : dans la première opération, nous avons eu un accroissement de disgrégation, transformation positive, et une transformation de chaleur en travail que nous avons trouvée être de signe contraire, donc négative. Dans la deuxième opération il y a une diminution de disgrégation, transformation négative ; et une transformation de travail en chaleur qui est de signe contraire, donc positive.

Quant à la valeur numérique de ces transformations, remarquons que la transformation de disgrégation est la même dans les deux opérations en grandeur absolue ; les deux transformations simultanées de chaleur en travail et de travail en chaleur, qui lui sont équivalentes, doivent donc avoir aussi la même valeur numérique. Or, nous avons vu que, dans le second cas, la quantité de chaleur ou de travail est deux fois moindre que dans le premier, et que la température absolue du gaz par l'intermédiaire duquel la transformation est opérée est également deux fois moindre ; il en résulte que le rapport de la quantité de chaleur transformée en travail, ou produite par du travail, à la température absolue, est le même dans les deux opérations précédentes, et que nous pourrons prendre ce

rapport comme valeur numérique de ces deux transformations, ainsi que de la transformation équivalente de disgrégation.

Dans la première opération donc, la somme algébrique de l'accroissement de disgrégation et du rapport de la quantité de chaleur, transformée en travail, à la température absolue du gaz, est égale à zéro, cette dernière quantité étant négative, comme représentant la valeur d'une transformation négative.

Dans l'autre opération, la somme algébrique de la diminution de disgrégation, qui est une transformation négative, et du rapport de la quantité de chaleur, produite par du travail, à la température absolue du gaz, est égale à zéro.

La valeur numérique d'une transformation de chaleur en travail, ou *vice versa*, telle que nous venons de la déterminer, est donc égale en grandeur absolue au rapport de la quantité de chaleur à la température absolue à laquelle la transformation s'est effectuée. Cette valeur numérique n'est pas, comme on le voit, l'expression d'une grandeur concrète; c'est plutôt une expression destinée à traduire aisément la condition nécessaire pour que deux transformations puissent se remplacer mutuellement, dans un cycle d'opérations réversibles, sans donner naissance à une autre transformation simultanée.

Recherchons maintenant de la même manière la valeur numérique de la transformation d'une quantité de chaleur à une certaine température en la même quantité de chaleur à une autre température; et pour cela, reprenons sommairement le cycle fermé décrit plus haut.

Dans la première opération, le gaz a doublé de volume à la température constante de  $273^{\circ}$  C. (ou  $2 \times 273^{\circ}$  A) en transformant une certaine quantité de chaleur en travail.

Dans la deuxième, on abaissait sa température à  $0^{\circ}$  C. en faisant passer l'excédent de chaleur dans un réservoir.



Dans la troisième, on le comprimait à cette température constante  $0^{\circ}\text{C}$ . ( $273^{\circ}\text{A}$ ) et il se produisait ainsi une transformation de travail en chaleur, la chaleur produite étant de moitié moindre que celle qui avait été transformée en travail dans la première opération ; et cette chaleur était reçue par un corps à  $0^{\circ}\text{C}$ .

Dans la quatrième opération enfin, on reprenait au réservoir, pour la restituer au gaz, la chaleur que celui-ci lui avait cédée, de sorte que le gaz était ramené à son état initial.

En considérant l'ensemble de ce cycle fermé, nous pourrions faire abstraction de la deuxième et de la quatrième opération, puisque la chaleur, cédée dans la deuxième à un réservoir par le gaz, est restituée à celui-ci par le même réservoir dans la quatrième. De plus, si nous voulons considérer la quantité de travail, dont nous avons fait usage dans la troisième opération, comme empruntée à celle qui avait été produite dans la première, nous aurons en résultat final, dans le cas actuel, une quantité de chaleur, de moitié moindre que dans la première opération, transformée en travail, et, de plus, le transport de la quantité de chaleur produite par la troisième opération à un corps à  $0^{\circ}\text{C}$ . ; mais cette quantité de chaleur ne provient que de celle qui a été fournie dans la première opération au gaz à la température de  $273^{\circ}\text{C}$ ., et dont une moitié est restée transformée en travail, tandis que l'autre, après avoir été transformée de même, est repassée à l'état de chaleur dans la troisième opération ; de sorte que nous avons une transformation d'une certaine quantité de chaleur à  $273^{\circ}\text{C}$ . ( $2 \times 273^{\circ}\text{A}$ ) en chaleur à  $0^{\circ}\text{C}$ . ( $273^{\circ}\text{A}$ ).

Or, si nous supposons cette dernière transformation donnée, et que nous effectuions tout le cycle précédent en sens inverse, elle sera anéantie et remplacée par la transformation d'une quantité de travail en chaleur, transformation qui sera précisément l'inverse de celle que nous venons d'obtenir comme résultat final, conjointement avec

la transformation de chaleur à  $273^{\circ}$  C. en chaleur à  $0^{\circ}$  C. Ces deux transformations sont donc égales et de signes contraires, ou leur somme algébrique est nulle.

On déduit aisément de ces considérations, en généralisant l'exemple qui précède, que la valeur numérique de la transformation d'une certaine quantité de chaleur, à une température donnée, en chaleur à une autre température, est égale à la somme algébrique des valeurs numériques de deux transformations, dont la première serait celle de cette chaleur à la première température en travail, et la seconde celle de ce travail en cette même quantité de chaleur à la seconde température.

Remarquons que la première de ces deux transformations est négative, et la seconde positive ; qu'elles ont le même numérateur, qui est la quantité de chaleur donnée, et que, par suite, leur somme sera positive si le dénominateur de la première est plus grand que celui de la seconde, et négative dans le cas contraire. Le passage d'une quantité de chaleur d'une certaine température à une température plus basse est donc une transformation positive, le passage inverse, une transformation négative.

Ainsi, parmi les trois genres de transformations directes et inverses que nous avons examinées, les positives sont :

L'accroissement de disgrégation, la transformation de travail en chaleur, le passage d'une température plus élevée à une température plus basse.

Les négatives sont :

La diminution de disgrégation, la transformation de chaleur en travail, le passage d'une température plus basse à une température plus élevée.

Nous avons déterminé les valeurs numériques de ces trois genres de transformations, et l'exemple simple que nous avons choisi nous a conduit à ce résultat que, dans tout cycle réversible, la somme algébrique des valeurs numériques des transformations est égale à zéro.

Ce principe, que nous avons démontré en supposant que

le corps au moyen duquel les transformations ont été opérées est un gaz permanent, est applicable quel que soit le corps dont on fait usage.

Supposons en effet que cela ne soit pas, et qu'un cycle d'opérations réversibles effectuées sur un gaz ait donné pour résultat une certaine transformation de chaleur en travail, en même temps que le passage d'une quantité déterminée de chaleur, de  $273^{\circ}$  à  $0^{\circ}$ , par exemple, la somme de ces deux transformations étant nulle ; tandis qu'un cycle analogue effectué sur un autre corps aurait donné une somme de transformation qui n'est pas nulle ; il faudrait pour cela que, si la quantité de chaleur transformée en travail est la même que dans le cas du gaz, la quantité de chaleur qui a passé de  $273^{\circ}$  à  $0^{\circ}$  fût différente. Supposons-la plus grande, et renversons ce dernier cycle : nous anéantirons le premier, à part un excès de chaleur qui aura passé, sans compensation aucune, d'un corps à  $0^{\circ}$  à un corps à  $273^{\circ}$ , ce qui est absurde.

Les autres cas se traiteraient de la même manière ; et, pour le dire en passant, c'est dans ce cas particulier que consiste, à proprement parler, le principe de Carnot.

Quel que soit donc le corps qui subit des modifications réversibles, on peut lui appliquer le principe que la somme algébrique des valeurs numériques des transformations est égale à zéro.

Voyons comment ce principe de Clausius se modifiera pour les cycles non réversibles.

Le principe tout à fait général est que cette somme est nécessairement positive dans tous les cycles, quels qu'ils soient, et qu'elle n'est nulle qu'à la limite, c'est-à-dire quand les modifications deviennent réversibles, limite qui, nous l'avons vu, ne peut pas être atteinte. Nous nous bornerons ici à faire voir que cette somme ne saurait être négative, et nous constaterons par des exemples bien connus qu'il est une foule de phénomènes naturels dans lesquels elle est positive.

Si la somme algébrique des valeurs des transformations qui s'opèrent dans un cycle quelconque était négative, c'est-à-dire, si la somme des transformations négatives l'emportait sur celle des transformations positives, nous pourrions prendre dans la première somme une partie égale à la seconde, de sorte que l'autre partie se composerait de transformations négatives non compensées; or celles-ci pourront toujours se ramener à un passage de chaleur d'un corps froid à un corps plus chaud, comme nous allons le voir, au moyen de l'addition d'un cycle réversible, c'est-à-dire de plusieurs transformations dont la somme est nulle, et ne peut, par conséquent, pas altérer la somme finale.

Les transformations négatives, en effet, sont :

1° Une diminution de disgrégation. Celle-ci peut être anéantie et remplacée par une transformation de chaleur en travail au moyen d'un cycle réversible;

2° La transformation de chaleur en travail, à laquelle nous venons de ramener la première transformation négative.

Cette transformation peut être anéantie en renversant la série des opérations que nous avons effectuées précédemment sur un gaz permanent, et remplacée par le passage d'une certaine quantité de chaleur d'une température plus basse à une température plus élevée;

3° Enfin cette dernière transformation, à laquelle peuvent se ramener les deux précédentes.

Si donc une transformation négative pouvait se présenter, sans compensation, comme résultat d'un cycle quelconque d'opérations, cela reviendrait à dire qu'il a pu passer, sans compensation, de la chaleur d'un corps froid à un corps plus chaud, ce que nous avons reconnu impossible.

Au contraire, les transformations positives peuvent se présenter seules, et se présentent en effet très fréquemment dans la nature.

Parmi les nombreux exemples que l'on en peut citer, nous choisirons les suivants :

Un gaz permanent, mis tout à coup en communication avec un espace vide, s'y répandra sans effectuer aucun travail et sans perdre aucune chaleur ; voilà donc un accroissement de disgrégation qui s'est effectué sans aucune autre transformation simultanée.

Le travail peut se transformer en chaleur sans qu'il se produise de transformation négative, comme on le voit dans la production de la chaleur par le choc des corps mous, par le frottement et par la résistance des milieux, ou par la résistance de l'air et par celle du conducteur dans les phénomènes électriques.

On sait avec quelle facilité le travail des forces moléculaires se transforme en chaleur, souvent même avec accroissement de disgrégation, dans les combinaisons chimiques, tandis que la production du froid est toujours accompagnée d'un accroissement de disgrégation soit par dissolution, soit par évaporation.

Enfin nous voyons constamment la chaleur passer d'elle-même, par conductibilité ou par rayonnement, d'un corps chaud à un corps plus froid.

Les transformations positives peuvent donc survenir sans qu'il se présente de transformations négatives simultanées ; celles-ci, au contraire, ne le peuvent pas sans être accompagnées de transformations positives au moins équivalentes ; en d'autres termes, les transformations non compensées ne peuvent être que positives, ou la somme algébrique des valeurs des transformations d'un cycle quelconque d'opérations ne peut être que positive.

Tel est le principe général dû à Clausius. Si nous l'exprimons analytiquement en tenant compte de la manière dont nous avons évalué numériquement les transformations, nous pourrions l'énoncer sous la forme suivante, dans laquelle le mot accroissement est pris dans un sens algébrique : si, pour un cycle quelconque, on ajoute les accroissements de disgrégation aux accroissements de chaleur, divisés respectivement par les températures absolues

auxquelles ils s'effectuent, la somme obtenue ne pourra être que positive.

Si donc, d'une part, en vertu du principe de Mayer, il y a toujours équivalence entre la chaleur consommée ou produite et le travail produit ou consommé, dans les modifications que peut subir un système de corps sous l'influence de la chaleur et des différentes forces tant intérieures qu'extérieures qui agissent sur lui, d'autre part, en vertu du principe de Clausius, chaque série de modifications amènera, en général, un accroissement de disgrégation et de chaleur, produit au détriment de la quantité de travail fournie par les forces qui agissent sur le système; cette dernière quantité ne fera donc que décroître d'une série à la suivante, tandis que la somme des premières ne fera que croître.

Ces lois, qui existent pour un système quelconque de corps, peuvent évidemment s'étendre à l'univers tout entier, et il en résulte que la quantité de travail des forces qui l'animent décroissant toujours, finira par devenir nulle, en se transformant sans cesse en un accroissement de la disgrégation et de la quantité de chaleur, et que la somme de celles-ci tend vers un maximum.

Examinons maintenant plus en détail les conséquences de ces deux principes appliqués au système de l'univers.

Si nous voulons comprendre, sous le nom commun d'énergie, la force vive, le travail et la chaleur, qui ne sont que des quantités de même nature se rapportant à des mouvements plus ou moins rapides soit des corps, soit de leurs molécules, le premier principe pourra s'énoncer sous cette forme :

Une énergie quelconque peut se transformer en une autre équivalente, ou bien, la somme des énergies de l'univers est invariable, comme la somme des particules matérielles qui le constituent. Ainsi le travail de la gravité peut se convertir en force vive par la chute d'un corps, et cette force vive en mouvements vibratoires qui constituent

la chaleur ; l'énergie développée par la combustion de la poudre se transforme en chaleur, cette chaleur en force vive du boulet, et cette force vive enfin en un travail qui élève le poids du boulet jusqu'à ce que toute l'énergie soit dépensée, ou plutôt convertie en travail ; mais, dans tous les cas, il ne se perd ni ne se gagne aucune quantité d'énergie dans toutes ces transformations.

C'est là certes une magnifique synthèse des lois physiques, et qui semble bien favorable à l'éternité de l'univers ; eh bien, quelque éloignée qu'elle paraisse de ma thèse, je ne crains pas d'essayer de dérouler le tableau de la nature physique, tel que nous pouvons l'entrevoir grâce à cette splendide découverte de la transformation des forces.

Partons de l'hypothèse de Laplace sur la formation de notre système planétaire, hypothèse qui semble confirmée par les formes et les mouvements des planètes et de leurs satellites, par l'existence des comètes et par celle de l'anneau de Saturne.

Notre système aurait été primitivement une nébuleuse, c'est-à-dire un amas de matière gazeuse simplement animée d'un mouvement de rotation et soumise à ses attractions mutuelles ; cette matière se serait séparée en différentes masses en vertu de la force centrifuge, et ces masses partielles, se condensant par l'attraction, auraient formé le soleil et les différents corps du système, fluides d'abord, puis se solidifiant peu à peu à cause du rayonnement. On comprend déjà combien ce travail de l'attraction, cette chute des molécules gazeuses vers leurs centres respectifs a dû produire de chaleur. Helmholtz a calculé que, pour notre système planétaire, cette chaleur représentait 454 fois celle qui serait actuellement produite par la chute de toutes les planètes et de leurs satellites sur le soleil.

Notre terre ne reçoit aujourd'hui qu'une quantité très faible de chaleur de son noyau de feu ; où donc est la source de toutes les énergies qui se développent à sa surface ? Elle réside presque tout entière dans le soleil.

Étudions en effet les différentes forces dont nous disposons ; je laisse de côté le magnétisme et l'électricité, qu'il ne serait pas difficile de ramener également à l'action solaire comme à leur principe.

Nous disposons surtout de la force des cours d'eau, de celle des courants d'air, de la chaleur produite par les différents combustibles, enfin de notre force musculaire et de celle des animaux.

Or, d'où vient la première force, celle des cours d'eau ? Le soleil a vaporisé l'eau des mers, et a effectué ce grand travail de la dilatation ; en outre, il a dû élever la vapeur ainsi formée au sommet des montagnes, second travail ; la vapeur, en se condensant, a rendu une partie de la chaleur solaire sous forme de chaleur ou d'électricité, et a conservé, sous forme de travail potentiel, l'autre partie, celle qui équivaut au travail nécessaire pour élever son poids au sommet de la montagne ; en redescendant, elle nous rend, sous forme de force vive, la provision de chaleur solaire qu'elle avait absorbée.

La force des courants d'air n'a pas non plus d'autre cause : le soleil chauffe l'air, l'élève, et sa chaleur se transforme en travail potentiel ; cet air refroidi retombe par son poids, et c'est la force vive de sa chute que nous utilisons ; cette force vive n'est donc encore qu'une transformation d'une quantité équivalente de chaleur solaire.

Mais la chaleur des combustibles, dira-t-on ? Celle-là du moins ne vient pas du soleil ? Tout aussi bien que les précédentes, et que la force musculaire elle-même, qui a, avec celle de la combustion, la liaison la plus intime, comme nous allons le voir.

Tous nos combustibles sont exclusivement des matières végétales ou animales ; la houille n'est que du bois et de la tourbe fossiles ; les huiles de schiste, le pétrole, sont le produit de la distillation de végétaux enfouis depuis des siècles ; les corps gras proviennent tous du règne végétal ou du règne animal.



Or, c'est grâce à la lumière et à la chaleur solaires que les plantes s'assimilent le charbon contenu dans l'acide carbonique qui est mêlé à l'air. Pour séparer l'oxygène du carbone et retenir celui-ci, la plante doit effectuer un grand travail, et c'est le soleil qui le lui fournit; la fraîcheur des forêts a pour principale cause cette conversion de la chaleur solaire en travail de la végétation. C'est ce même travail que le tissu végétal et les corps gras convertissent en chaleur quand ils brûlent, c'est-à-dire quand ils s'unissent de nouveau à l'oxygène, de sorte que la chaleur produite par la combustion est directement empruntée au soleil.

La plante donc s'empare du charbon renfermé dans l'acide carbonique de l'air, et met l'oxygène en liberté; cet oxygène est respiré par les animaux, et s'unit dans leurs poumons au sang, qui est le produit de la digestion des aliments; c'est la chaleur résultant de cette combustion effectuée continuellement dans les poumons qui est la source de l'énergie animale. Et d'où vient cette chaleur? Du travail dont étaient capables l'oxygène libre et le sang; et ces deux éléments nous sont fournis en dernière analyse par le règne végétal qui les doit au soleil.

Il y a certes une ravissante harmonie dans ces deux grands règnes de la nature, dont chacun tire sa nourriture et sa force des produits mêmes qui sont rejetés par l'autre, de telle façon que la prospérité de l'un des règnes doit entraîner celle de son rival; et l'on pourrait se demander par quelle sorte de vertu secrète les molécules gazeuses du chaos se sont groupées dans cet ordre admirable; mais la science positive nous reprocherait de faire du sentiment, et nous tenons à demeurer sur son propre terrain. Admettons donc que ce soit l'action seule des forces naturelles qui ait produit toutes les vies qui se développent à la surface de la terre. Le soleil suffit à maintenir leur activité physique; sa chaleur se transforme en courants d'air ou d'eau, en puissance expansive des

gaz et des vapeurs, en électricité, en bois, en fleurs, en fruits, en force musculaire; aussi longtemps qu'il pourra nous fournir une chaleur suffisante, la durée du monde et de la vie semble assurée. Mais cette chaleur qu'il nous fournit doit pouvoir lui être restituée par du travail, car tous les corps reçoivent de lui une chaleur beaucoup plus considérable que celle qu'ils lui renvoient par rayonnement.

Où trouver ce travail? Si on le cherchait dans une condensation du soleil, condensation qui produirait une chaleur énorme, ou dans une diminution de sa vitesse de rotation due à des marées dont le frottement se convertit en chaleur, on échapperait à la mort pour quelques milliers de siècles; mais qu'est-ce que cette durée vis-à-vis de l'éternité?

Si l'on cherche avec Mayer ce travail dans la chute des comètes et des aérolithes sur le soleil, sans doute on trouvera encore là une source notable de chaleur, puisque la chute d'une masse sur le soleil produirait, selon qu'elle se meut plus ou moins directement vers lui, une quantité de chaleur comprise entre celles que fournirait la combustion d'une masse de houille de quatre mille à neuf mille fois plus grande; et cette chute de corps nécessaire à l'entretien de la chaleur solaire produirait une augmentation de volume imperceptible après quatre mille ans. Mais encore n'est-ce là qu'un palliatif, et, en outre, on voit clairement que la masse du soleil allant en augmentant, il finira par attirer à lui les planètes, à commencer par les plus rapprochées, de sorte que notre système solaire se réduirait en chaleur.

Cette alimentation du soleil par la chute des mondes n'est qu'une hypothèse, très probable à la vérité; et fût-elle exacte, il n'y a pas là de quoi effrayer ceux qui croient à l'éternité de l'univers; car la chaleur ainsi produite, affirmeront-ils, pourra de nouveau se convertir en travail et former de cette manière un autre univers. Au reste, il

n'est nullement nécessaire que le soleil nous prodigue toujours la même chaleur qu'aujourd'hui ; quand elle aura décréu, nous diront-ils, les vies qui se manifestent aujourd'hui sur la terre feront place à d'autres vies qui auront moins besoin de chaleur, comme les plantes et les animaux gigantesques de la période antédiluvienne ont fait place à ceux de l'époque actuelle. Toutes ces conséquences n'ont rien d'incompatible avec la loi de la conservation de l'énergie, la science est obligée de le reconnaître, et elle le fait franchement. Je n'attends pas moins de sincérité des partisans de la doctrine de l'éternité de l'univers, dans l'examen des conséquences de la seconde loi fondamentale qui n'est, comme celle de la conservation de l'énergie, qu'une généralisation des faits observés dans la nature.

Nous avons vu que la seconde loi conduisait à ce double résultat : d'une part, qu'il y a plus de transformations de travail en chaleur que de transformations en sens inverse, de sorte que la quantité de chaleur augmente constamment aux dépens de la quantité de travail ; d'autre part, que la chaleur tend à s'équilibrer, à se répartir d'une manière de plus en plus uniforme dans l'espace, et la disgrégation des corps à s'accroître ; il s'ensuit que l'univers se rapproche fatalement de jour en jour, en vertu des lois naturelles, d'un état d'équilibre final de température, dans lequel les distances entre les molécules des corps seront arrivées à leur extrême limite, et qui rendra toute transformation nouvelle impossible ; alors, suivant une expression mémorable reproduite par Tyndall, « les éléments seront dissous par le feu » (1). Tel est donc le terme fatal du monde ; sorti du chaos, il rentrera dans le chaos, avec cette différence toutefois qu'il ne sera plus animé de ce mouvement de rotation qu'avait le chaos originaire, et qui lui a permis de se séparer en différents groupes d'attrac-

(1) Citation extraite d'une épître de saint Pierre, dans *La chaleur considérée comme un mode de mouvement*, trad. de l'abbé Moigno, p. 435. Paris, E. Giroud.

tion; ce mouvement de rotation aura lui-même été converti tout entier en chaleur.

Voici une considération au reste qui fera pour ainsi dire sauter aux yeux cette conversion finale de toutes les forces naturelles en chaleur. J'ai dit que le travail renfermé originairement dans la matière nébuleuse de notre système solaire était 454 fois plus grand que le travail des forces qu'il renferme encore actuellement, ou que celui-ci n'est plus que la 454<sup>e</sup> partie du travail primitif. Que sont donc devenues les 453 autres parties de ce travail? Elles sont réduites en chaleur; et la partie restante suit la même tendance. Le monde finira donc, sans qu'il lui soit possible de se reconstituer au moyen des forces naturelles existantes; et la science, la science positive surtout, n'a pas le droit de supposer que ces forces puissent avoir manifesté auparavant ou qu'elles puissent, un jour, manifester des lois différentes de celles qui ont été reconnues par l'expérience.

Il y a plus encore; non seulement le monde finira, mais il a commencé. Et, en effet, s'il existait depuis toute éternité, il y a une éternité déjà qu'il aurait dû finir, puisque la tendance à l'anéantissement de tout travail et à l'équilibre final de température, agissant depuis toute éternité, aurait dû se réaliser entièrement depuis une éternité déjà. On est donc en droit d'affirmer scientifiquement que l'univers, constitué avec les lois physiques que nous lui connaissons, et il est interdit à la science positive d'en supposer d'autres, n'existe que depuis un temps limité, quelque long du reste qu'il puisse être. Et quelle cause l'a ainsi constitué dans le temps? Une cause inhérente à lui-même? Mais ce serait absurde, car cette cause aurait dû agir aussi bien de toute éternité. Cette cause ne peut être que le fait d'une volonté libre, et la Création se trouve ainsi démontrée physiquement, j'allais dire mathématiquement.

Et qu'est-ce qui nous empêche d'admettre, et même

d'espérer que cette Cause, qui a constitué l'Univers dans le temps avec les forces qui l'animent, pourra agir à la fin des temps sur le morne chaos auquel il se trouvera réduit, pour lui imprimer une activité nouvelle et reconstituer un autre Univers ? Alors seraient réalisées ces paroles fatidiques écrites depuis près de trente siècles (1) : « Au commencement Tu as fondé la Terre, et les Cieux sont les œuvres de Tes mains ; ils périront, mais Toi, Tu subsistes éternellement ; et ils vieilliront tous comme un vêtement, et Tu les changeras comme un manteau, et ils seront transformés. »

F. FOLIE.

(1) Ps. 101.

---