

L’évolution des mondes

Svante August Arrhenius

LU AVEC LIREGRATUITEMENT.COM

Livre libre de droits, lisible gratuitement en ligne et en quinze minutes par jour.

01

Des catastrophes sismiques d'une importance exceptionnelle ont dans ces derniers temps ramené l'attention sur les forces puissantes des éruptions volcaniques ou des tremblements de terre. Tout le monde a encore présent à l'esprit celle qui, en avril 1906, a ravagé les riantes campagnes des environs du Vésuve, celles de Californie et du Chili, où la capitale, Valparaiso, a été presque détruite. Plus récemment enfin celle du 28 décembre 1908 a causé à Messine, à Reggio, et dans tout le pays environnant, des pertes énormes de vies humaines et de propriétés. À l'exception de ce dernier cataclysme, qui est un des plus grands dont l'histoire gardera le souvenir, les autres sont cependant insignifiants, si on les compare à certains bouleversements plus anciens, dont le récit est venu jusqu'à nous.

L'éruption volcanique la plus violente de notre époque est sans doute celle des 26 et 27 août 1883 qui a fait disparaître environ les deux tiers de l'île de Krakatoa. Cette île, qui se trouve dans le détroit de la Sonde entre Sumatra et Java, avait une surface d'environ 33 kilomètres carrés. Bien qu'elle fût inhabitée elle-même, l'explosion qui la fit disparaître presque en entier entraîna cependant la mort de 40 000 personnes environ, principalement par l'effet de la puissante vague qui fut créée par le phénomène, et qui causa des raz de marée considérables dans toutes les régions avoisinantes de l'île.

Les conséquences du tremblement de terre de février et mars 1783, dans les Calabres, avaient été plus grandes encore. Le

5 février de cette année, l'importante ville de Messine fut détruite, et l'on estime à 100 000 le nombre des personnes tuées dans cette occasion. Cette même région, mais plus particulièrement celle des Calabres, a été affligée le 3 septembre 1905 par toute une série de secousses destructives.

Une autre catastrophe, qui est restée historique par suite du nombre considérable de victimes humaines qu'elle a faites, est celle qui détruisit la capitale du Portugal, la ville de Lisbonne, le 1 novembre 1755. Il y eut, selon les uns, 90 000 morts, selon d'autres, 30 000. Là encore, ce fut un raz de marée, formant une vague d'au moins 5 mètres de hauteur, qui se jetant sur les quartiers bâtis sur le rivage, noya au moins les deux tiers du total des victimes.

Les pertes matérielles les plus importantes furent celles de San-Francisco. On les évalue à 760 millions de francs, puis celles de Sicile et de Calabre (1908) où on les estime à 800 millions. En Californie il y eut relativement peu de vies perdues. Officiellement leur nombre n'est que de 709, mais il est probable qu'un nombre assez considérable de cas n'ont pas été enregistrés, des marins, des Chinois, des Japonais, etc. La dernière catastrophe de Sicile au contraire, a causé de nombreuses morts : on les estime à 90 000 au moins.

Le volcan le mieux connu, sur lequel on a pu faire les études les plus suivies, est le Vésuve. Du temps de la splendeur de Rome, ce Vésuve était une montagne paisible, un cône d'éruption éteint, et dont l'histoire ne rappelait aucune période d'activité. Tout autour de lui des colonies grecques s'étaient établies, attirées par la fertilité extrême du sol. Leur richesse était notoire, et avaient fait donner à la région le nom de la Grande Grèce. La ca-

tastrophe de l'an 79 fut foudroyante. Elle est connue de tous, pour avoir entraîné la destruction des villes de Pompéi et d'Herculanum. Les masses gazeuses qui, dans cette éruption, se firent jour, déplacèrent une importante partie du vieux cône volcanique, et c'est la portion qui en subsiste encore aujourd'hui qui porte le nom de Monte Somma. Les masses projetées en dehors, cendres et laves,

Fig. 1. — Le Vésuve. Vue prise de l'île de Nitida

par un temps d'activité moyenne. constituèrent le nouveau Vésuve, celui que nous voyons. L'aspect de celui-ci a maintes fois changé depuis lors, chaque éruption nouvelle contribuant à ces variations, et tout récemment, en 1906, un nouveau cône de cendres a été ainsi formé. Mais depuis l'an 79 le nombre des éruptions ne se compte plus. Il y en eut tout particulièrement dans les années suivantes : 203, 472, 512, 685, 993, 1036, 1139, 1500, 1631 et 1660. Les intervalles qui séparent ces années n'ont aucune régularité. Mais on peut dire que le Vésuve est d'une activité presque ininterrompue, la plupart du temps très faiblement, en sorte que le panache de fumée de son cratère rappelle presque seul que l'activité du feu intérieur persiste (fig. 1). Des années d'activité particulièrement violente, furent cependant celles de 1794, 1822, 1872 et 1906.

Àcôté des volcans d'activité puissante, comme celui-là, il y en a d'autres qui ne causent guère de dommages. Tel est le Stromboli, situé dans la mer Tyrrhénienne. L'activité de celui-ci est continue, peut-on dire, depuis des milliers d'années.

Fig. 2. — L'éruption du Vésuve de 1822, d'après un dessin

fait sur place par Poulett-Scrope. Ses éruptions se suivent avec rapidité, à des intervalles tantôt de moins d'une minute, tantôt de vingt minutes et plus. Son panache incandescent sert aux marins

de phare naturel. La force de ses éruptions est variable, cela va de soi, et l'on dit qu'en 1906 il aurait été exceptionnellement actif.

Il est d'autres volcans que l'on pourrait de même qualifier de paisibles. Tels sont par exemple les grands volcans de l'île de Hawaï dont les éruptions sont presque toujours fort insignifiantes ou tout au moins peu violentes.

Les matières expulsées par les volcans, loin de leurs phases d'activité, sont variées. Parmi elles la vapeur d'eau joue un rôle capital. Elle est cause que le nuage qui toujours se forme au-dessus du cratère est le signe le plus certain de la plus ou moins
Fig. 3. — L'éruption de 1872, d'après une photographie. grande activité de la montagne. Se produit-il des éruptions violentes ? Les masses de vapeur d'eau expulsées sont lancées en l'air avec une force inouïe ; elles atteignent alors jusqu'à 7 et 8 000 mètres d'altitude au-dessus de la montagne, comme on peut s'en rendre compte par les figures que nous reproduisons ici.

La hauteur du sommet du Vésuve est d'environ 1 300 mètres au-dessus du niveau de la mer. Les figures 2 et 3 permettent, en partant de là, d'apprécier la hauteur à laquelle s'élèvent les masses expulsées. La figure 2 est la reproduction d'un dessin de Poulett-Scrope fait pendant l'éruption de 1822. Il semble que l'air fut à ce moment d'une immobilité absolue. Les vapeurs expulsées ont, par suite, pu se répandre tranquillement, et ont pris, dans leur ensemble, la forme d'un pin maritime. Elle rappelle la nuée dont Pline l'Ancien nous a laissé une description, et qu'il avait observée pendant l'éruption de l'an 79. Mais si l'air n'est pas aussi absolument calme, la nuée prend une forme moins régulière, par exemple celle de la figure 3. Or des nuages qui s'élèvent à des hauteurs aussi grandes que celles dont nous parlons, sont

presque toujours le siège de puissantes décharges électriques. Des éclairs nombreux et énormes se produisent presque toujours, illuminant ce nuage ténébreux, et contribuent à rendre infiniment impressionnant le spectacle que l'on a sous les yeux.

Ce nuage, du reste, se résout promptement en pluie. Elle est mêlée à la cendre que le volcan a projetée en même temps, et elle est conséquemment souvent noire comme de l'encre. La cendre elle-même, séchée, a des couleurs variées allant du gris clair, du gris jaune et du brun jusqu'au noir. Elle est constituée par de minuscules gouttelettes de lave, qui ont été entraînées par le jet puissant de vapeur d'eau que le volcan expulse, et qui se sont vite figées en arrivant dans l'atmosphère. Des gouttes de lave un peu moins ténues se solidifient en formant comme des grains de sable, ou encore en « lapilli », c'est-à-dire petites pierres, et enfin en « bombes » plus grosses, que leur trajet dans l'air raye parfois, ou auxquelles il donne des aspects piriformes. Ce sont ces produits solides qui font en général le plus de dégâts. En 1906 le poids des masses expulsées, retombant en couches épaisses, a suffi pour écraser des toitures de maisons (voy. fig. 4). Une couche de 7 mètres d'épaisseur a recouvert jadis Pompéi d'un linceul pesant et protecteur, qui a subsisté jusqu'aux fouilles entreprises dans des temps encore très récents. La cendre fine qui composait la matière enveloppante, et la boue produite par la pluie ont moulé les objets sur lesquels elles tombaient et en ont fait des moulages comme si elles étaient constituées par du plâtre. Ce moule a durci ensuite, les objets moulés ont peu à peu disparu par la décomposition, et il a été souvent possible de couler dans les vides ainsi conservés, du plâtre qui a reproduit avec fidélité la forme de l'objet primitif.

Fig. 4. — L'éruption du Vésuve de 1906, d'après une photographie.
Les nuages sont constitués principalement par des cendres.

C'est de cette même façon qu'il se forme au fond de la mer, si les cendres volcaniques y tombent en abondance, une couche de tuf, qui enveloppe les algues ou les êtres marins qu'elle recouvre. Tel est le sol dans le voisinage de Campagna Felice, près de Naples.

D'autres produits de l'éruption sont les ponces. Ce sont des pierres d'un volume plus grand, mais très poreuses, étant soufflées en quelque sorte par la vapeur d'eau qui les pénétrait au moment de leur refroidissement. On les voit flotter à la surface des eaux ou de la mer, et les vagues les réduisent petit à petit en sable volcanique, par l'effet du frottement réciproque. Ces masses de ponces sont parfois si abondantes que la navigation peut être grandement gênée et rendue dangereuse. Tel fut le cas dans les environs de l'île Krakatoa en 1883.

La vapeur d'eau n'est pas le seul produit gazeux expulsé par les éruptions volcaniques. Le principal est l'acide carbonique, mais on trouve encore de la vapeur de soufre, de l'acide sulfhydrique, de l'acide chlorhydrique, du chlorure d'ammonium ; moins abondamment enfin, des chlorures de fer et de cuivre, de l'acide borique, et encore quelques autres corps. Le vif refroidissement de tous ces corps qui arrivent incandescents dans l'atmosphère en condense une grande partie sur les parois même du volcan. Mais les plus volatils d'entre eux, l'acide carbonique et les autres acides mentionnés ci-dessus, peuvent se répandre sur des espaces considérables à l'entour de la montagne, et, soit par leur chaleur, soit par leurs propriétés vénéneuses, frapper de destruc-

tion toute vie humaine ou animale qui se trouvera sur leur trajet. Telle fut la cause de l'épouvantable catastrophe qui, le 8 mai 1902, anéantit la ville de Saint-Pierre, à la Martinique. L'éruption de la Montagne Pelée y causa la mort de 30 000 habitants dont presque pas un seul n'échappa.

Parfois aussi le volcan vomit du gaz hydrogène. Ce gaz s'enflamme et brûle en arrivant dans l'atmosphère, phénomène rare, mais qui a été observé dans le cratère du Kilauea, dans l'île d'Hawaï.

Il arrive que la cendre volcanique est transportée à de grandes distances par les courants atmosphériques. C'est ainsi que l'on a constaté le transport de ces produits d'éruption depuis la côte occidentale de l'Amérique du Sud jusqu'aux Antilles, d'Islande en Norvège et en Suède, du Vésuve (en 1906) jusqu'au Holstein. L'exemple le plus connu de ces transports est celui de l'éruption du Krakatoa qui, en 1883, projeta des cendres jusqu'à une hauteur de 30 kilomètres, et dont les particules les plus fines furent transportées par les courants atmosphériques sur toutes les parties du globe. Pendant deux ans la présence dans l'air de ces poussières furent la cause des splendides phénomènes observés au lever et au coucher du soleil, et auxquels on donna le nom spécial de « lueurs rouges ». Ces lueurs furent observées à nouveau en Europe en 1902, après l'éruption de la Montagne Pelée à la Martinique. Les poussières du Krakatoa causèrent encore un autre phénomène distinct du premier, qu'on désigne sous le nom de « nuages lumineux nocturnes ». Ces nuages flottaient à une hauteur d'environ 80 kilomètres dans l'atmosphère terrestre, et pouvaient ainsi se trouver éclairés par le soleil, longtemps après que celui-ci fut couché.

Le volcan Mauna-Loa, dans l'île d'Hawaï, a une altitude qui approche de celle du mont Blanc. Il a un certain nombre de cratères, parmi lesquels l'un porte le nom de Kilauea, et présente à l'étude un intérêt particulier. Ce cratère contient une mer de lave fondue, d'environ 12 kilomètres carrés de surface. Cette étendue varie toutefois assez considérablement. La lave bouillonnante, en fusion ignée, lance continuellement dans l'atmosphère des masses gazeuses, par de faibles explosions. Des jets incandescents s'élèvent à ces moments, à des hauteurs d'une vingtaine de mètres. Çà et là, au pourtour de ce lac de feu, la lave déborde, s'écoulant par les fentes des parois, et se répand sur les pentes de la montagne, jusqu'à ce que, par cet écoulement, le niveau de la lave se soit de nouveau affaissé plus bas que le point d'écoulement. La lave est en général assez fluide, ce qui lui permet de se répandre assez aisément sur de grandes surfaces.

Des inondations analogues de lave se produisent de temps en temps en Islande, se répandant sur des milliers de kilomètres carrés. Une éruption de ce genre particulièrement importante fut celle du Laki, en 1783. Elle inonda de laves une région inhabitée, mais malgré cela les dégâts qu'elle causa furent des plus importants. Des phénomènes du même genre se sont produits dans des époques plus reculées, pendant les époques géologiques de notre planète. Pendant la période tertiaire, notamment, des nappes formidables de lave se sont répandues

Fig. 5. — Lave en blocs du Mauna Loa. à la surface du sol. Elles ont recouvert, par exemple, l'Angleterre et l'Écosse sur une surface d'au moins 100 000 kilomètres carrés. Au Dekkan, dans l'Inde, on a constaté un champ de lave de 400 000 kilomètres carrés, et atteignant jusqu'à 2 000 mètres d'épaisseur. Le Wyoming, le Yellowstone-Park, le Nevada, l'Utah, l'Orégon et d'autres

régions encore des États-Unis, puis encore la Colombie britannique ont d'immenses champs de laves anciennes, de même nature et provenance.

La lave, s'écoulant des cratères, ne se présente pas toujours
Fig 6. — Le geyser « Excelsior », dans le Yellowstone-Park, Wyoming.
Reliquat d'une puissante action volcanique pendant l'époque tertiaire. de la même façon. Elle contient parfois des masses gazeuses énormes, qui, en se frayant un passage à l'air au moment de la solidification, brisent la matière en blocs rugueux et déchirés, de dimensions fort inégales, et forment ainsi la lave en blocs (blocklava).

Lorsque ces coulées de lave se répandent dans des régions habitées et cultivées, la dévastation qu'elles causent est immense. Toutefois la perte de vies humaines est en général peu importante, la progression de la coulée étant naturellement lente, par suite de la viscosité de la masse.

Quand l'activité volcanique vient à diminuer, ce qui est en général graduel, ou si elle vient à cesser tout à fait, il en reste cependant presque toujours des traces. Les régions où elle s'est produite présentent ordinairement des lieux d'émission où des gaz et des eaux thermales s'échappent du sol. Ces faits s'observent dans beaucoup de régions où les volcans de la période tertiaire répandaient leurs champs de lave. Citons à ce sujet la région des geysers de l'Islande, ceux du Yellowstone-Park (voy. fig. 6) et de la Nouvelle-Zélande. La thérapeutique profite aujourd'hui largement des vertus des eaux si renommées de la Bohême (Karlsbad, etc.). Il serait aisé d'énumérer un très grand nombre de manifestations analogues, telles que les fumeroles

d'Italie, de la Grèce et d'autres pays encore ; les mofettes chargées d'acide carbonique, fréquentes dans les montagnes de l'Eifel (Prusse rhénane), dans la grotte du Chien à Naples, et dans la vallée de la Mort à Java ; les solfatares des Champs Phlégréens, aux environs de Naples, celles de Grèce, qui vomissent des vapeurs de soufre, de l'acide sulfhydrique et de l'acide sulfureux, et bien d'autres encore.

Du même ordre sont les volcans dits « de boue » qui expulsent des eaux salées, des gaz et des boues variées. Les gaz qui s'en échappent sont, en général, de l'acide carbonique et des carbures d'hydrogène. Tels sont ceux de Parme et de Modène, ceux de Kronstadt en Transylvanie.

Quelques-unes des plus hautes montagnes du globe sont des volcans éteints. Tels sont l'Aconcagua (6 970 mètres) dans la Cordillère de l'Amérique du Sud et le Kilimandjaro (6 010 mètres) de l'Afrique centrale. Leur destruction par les intempéries est rapide, car ils sont constitués en grande partie par des matériaux divisés et meubles, de cendre volcanique entremêlée de laves, par coulées. Ces dernières qui occupent des dispositions rayonnantes autour du centre d'éruption, protègent les parties qu'elles recouvrent contre les érosions. Mais sur leurs bords l'action des eaux est d'autant plus puissante, ce qui produit souvent de véritables coupes dans la masse de l'ancien cône volcanique, et même dans les couches terrestres que les éruptions ont recouvertes jadis.

Le Monte Venda, près de Padoue, présente un très intéressant exemple d'un cas semblable. On peut y observer comment du calcaire sédimentaire sous-jacent a été métamorphisé par la lave chaude qui s'est répandue à sa surface, et a été, par cette action,

transformé en marbre sur une épaisseur d'environ un mètre. Mais on trouve d'autres cas, où le calcaire situé au-dessus d'une couche de lave a subi un métamorphisme analogue. On doit en conclure que la lave ne s'est pas toujours répandue par-dessus le bord d'un cratère, mais qu'elle s'est parfois frayé un chemin souterrainement, par exemple dans les fentes séparatives de deux couches calcaires de nature différente. On constate de semblables infiltrations souterraines dans les lakkolithes de l'Utah, dans certaines formations du Caucase. Dans ces endroits, les couches supérieures ont été soulevées par la lave arrivant sous pression. Mais cette lave s'est solidifiée avant d'avoir pu arriver à la surface, pour s'épandre comme d'un volcan.

Toute une série de granits n'ont pas d'autre origine. Tels sont les batholithes, que l'on trouve principalement en Norvège, en Écosse, à Java. Parfois il n'est resté de tout le volcan, qu'un noyau de lave solidifiée. Ces noyaux, qui sont les restes de ce qui remplissait jadis le conduit central d'un volcan, sont très fréquents en Écosse et dans l'Amérique du Nord, où on leur donne le nom de « Necks » (fig. 7).

On trouve au Colorado des vallées profondes, désignées sous le nom de « Cañons », dont les parois sont pour ainsi dire verticales, et qui sont le résultat de l'érosion par l'eau des rivières qui coulent encore, ou qui ont coulé dans leur fond. Ces parois permettent d'y faire des études d'un haut intérêt, comme le montre, par exemple, un dessin de Dutton, reproduit schématiquement
Fig. 7. — Mato Tepee, dans le Wyoming.
Un type de neck volcanique. dans la figure 8. La paroi qu'il représente a une hauteur franche d'environ 800 mètres. On y remarque quatre traînées qui ne sont autre chose que des fissures,

remplies jadis par des laves qui s'élevaient par elles jusqu'à la surface. Au sommet d'une de ces fissures, il existe encore aujourd'hui un petit cône de cendres volcaniques, tandis que ceux qui, sans doute ont également existé à l'exutoire des trois autres fissures, ont disparu, emportés par les eaux superficielles, tandis qu'il subsiste encore à chacun un petit « Neck ». Il semble évident qu'une poussée de lave très fluide s'est produite dans des fissures préexistantes, et qu'elle a atteint la surface du sol, avant de se refroidir et de se figer. Il faut reconnaître que la pression sous laquelle arrivait la lave devait forcément être puissante, sans quoi elle n'aurait pas pu atteindre la surface sans se figer.

L'explosion du Krakatoa, en 1883, fit disparaître la moitié du volcan. L'autre moitié resta en place. Elle montre très nettement la coupe d'un cône volcanique qui n'a subi que d'assez faibles érosions par l'eau. On y reconnaît encore aujourd'hui, dans l'axe du cône, le bouchon de lave consolidée, qui occupe l'ancien conduit du cratère. Rayonnant autour de celui-ci on voit des couches de lave, de couleur claire, séparant d'autres
Fig. 8. — Figure schématique d'un terrain avec fissures remplies de lave, surmonté d'un cône de cendres volcaniques dans le Torowheap Cañon, sur le plateau du Colorado. couches plus foncées de cendres, à la surface desquelles elle s'est successivement répandue.

La répartition des volcans à la surface du globe présente une certaine régularité, facile à constater. Presque tous se trouvent dans le voisinage des mers. Quelques-uns, — ceux de l'intérieur de l'Afrique, — en sont seuls éloignés. Mais ceux-là aussi se trouvent dans le voisinage de grandes nappes d'eau ; les lacs africains sont presque des mers intérieures. On parle bien de

quelques volcans qui existeraient au centre de l'Asie, mais cette existence est très douteuse.

D'autre part il est des étendues de côtes considérables dans le voisinage desquelles on ne trouve aucun volcan. Tels sont les rivages de l'Australie, et la longue étendue des côtes de l'océan du Nord, qui baigne l'Europe, l'Asie et l'Amérique. On ne trouve de volcans que là, où, dans le voisinage de la mer, on constate l'existence de fentes de l'écorce terrestre. Il existe souvent de ces brisures loin de la mer, comme par exemple dans les Alpes d'Autriche, mais on n'y constate jamais de signes d'activité volcanique. Par contre ces mêmes régions sont en général bien connues pour les phénomènes sismiques qui y sont fréquents.

Il était naturel que depuis longtemps on expliquât les volcans au moyen de l'hypothèse que par eux, la masse en fusion qui occupe l'intérieur du globe, se frayait un chemin jusqu'à la surface. On a même essayé d'évaluer la profondeur à laquelle devaient se trouver ces foyers d'éruption, mais les résultats de ces estimations n'ont conduit à aucune concordance. On a, par exemple, soumis à une recherche de ce genre le Monte Nuovo, qui surgit en 1538 dans les Champs Phlégréens, près de Naples. On est arrivé, tantôt à une profondeur de 1 300 mètres, tantôt à 30 kilomètres ! Pour le Krakatoa on a évalué à plus de 50 kilomètres la profondeur du centre d'éruption. Mais tous ces calculs ont en somme peu d'intérêt, car il est probable que tous les volcans se trouvent sur des fentes de l'écorce terrestre, par lesquelles la masse fondue, le magma intérieur, pressé comme un coin, se trouve poussé vers la surface. Il serait donc difficile de dire où se limite le foyer de ce magma et où commence le conduit d'émission. Le Kilauea seul donne l'impression que l'on se trouve peut-

être en présence d'une grande ouverture qui traverserait toute l'écorce terrestre, et par laquelle la masse intérieure fondue se présente librement à la surface du globe (fig. 9).

Les observations recueillies à l'occasion de sondages profonds dans les diverses contrées du globe ont fait connaître que la température s'élève assez rapidement, à mesure que l'on pénètre dans l'écorce terrestre. En moyenne cet accroissement est de 30 degrés par 1 000 mètres de profondeur. Mais les sondages les plus profonds n'atteignent pas même encore 2 000 mètres. À Paruchowitz, en Silésie, on a été à 1 960 mètres, et à Schladebach, près Merseburg (province de Saxe) à 1 720 mètres. Si la progression continue à raison de 30 degrés pour chaque kilomètre de profondeur, on voit qu'à 40 kilomètres
Fig. 9. — Le cratère du Kilauea, Hawaï. de la surface terrestre il doit exister une température qui correspond à la fusion de la plupart des roches connues. Il est vrai que le point de fusion s'élève certainement avec la pression que subit la matière, mais l'importance de ce fait a sans doute été très exagérée lorsqu'on a cru pouvoir en conclure qu'à cause de lui l'intérieur du globe pourrait bien être solide. Tammann a prouvé, par des expériences, que la température de fusion ne s'élève par la pression que jusqu'à un certain point, à partir duquel cette température s'abaisse de nouveau, la pression croissant toujours.

Il ne serait donc pas absolument exact de supposer qu'à 40 kilomètres de profondeur toutes les roches fussent liquides. Mais on peut également faire cette hypothèse, que certaines roches se comportent comme la diabase, étudiée par Barus, dont la température de fusion s'élève de 1 degré par 40 atmosphères de pression, ce qui correspond à 155 mètres d'épaisseur de la croûte du

globe. On en déduit que l'épaisseur totale ne peut pas être plus grande que 50 à 60 kilomètres. Aux profondeurs plus grandes, tout doit être à l'état de fusion.

Dans cette masse fondue la silice, par suite de sa faible densité relative, doit se trouver prépondérante dans les couches supérieures. Les masses plus riches en oxyde de fer, celles que l'on désigne sous le nom de parties basiques du magma, sont vraisemblablement concentrées dans les régions plus profondes.

Comment convient-il de nous représenter ce magma ? Comme un liquide excessivement visqueux dont la consistance peut être comparée à celle de l'asphalte. Les silicates des roches se comportent en effet tout autrement quand la température de fusion est atteinte que ne le font les liquides ordinaires. MM. Day et Allen ont fait à ce sujet des expériences fort curieuses. Ils ont soumis à des températures excédant celle de la fusion, des bâtonnets de divers minéraux, tels que de l'albite et du microcline, qui sont des feldspaths. De petits prismes de 30 millimètres de long, sur 1 et 2 millimètres dans le sens transversal, appuyés par leurs deux bouts, ont été soumis, dans un four, à une température qui dépassait de 100 degrés celle de leur fusion. Ils ont conservé leur forme pendant 3 heures sans même se courber d'une façon sensible, tout en présentant, à la sortie du four, une apparence complètement vitrifiée, indicative d'une fusion certaine.

S'il en est ainsi, le magma central doit ne présenter que des mouvements et une diffusion des parties constituantes extrêmement faibles. Cela est surtout le cas dans les couches extérieures, sans doute les plus visqueuses, comme elles doivent être les plus acides.

Ce magma peut donc avoir, comme l'albite dans les expériences que nous venons de citer, à peu près l'apparence d'un corps solide. Les parties qui se révèlent à nous par les produits de volcans très rapprochés, comme le Vésuve, l'Etna, et Pantellaria, peuvent être de composition fort différente, comme c'est le cas pour les laves de ces trois endroits. Il n'en résulte nullement, comme le voudrait M. Stübel, que ces trois foyers volcaniques soient complètement isolés l'un de l'autre.

On a mesuré la température des laves du Vésuve, et on a trouvé, à l'extrémité inférieure de leur cours, qu'elles avaient encore de 1 000 à 1 100 degrés. D'autre part, on a constaté la présence dans leur masse, de certains cristaux, comme de la leucite et de l'olivine, et on a des raisons positives de penser que ces cristaux existaient déjà avant la sortie du cratère. Cela conduit à conclure qu'au moment de l'expulsion la température ne devait pas dépasser 1 400 degrés.

Il ne serait cependant pas exact de dire, à la suite de cette concordance, que le foyer du volcan, d'où proviennent les matières expulsées, se trouve à une profondeur de 50 kilomètres. Il est même probable que ce foyer se trouve beaucoup moins bas, peut-être à 10 kilomètres seulement ! Ici, comme dans bien d'autres endroits où il y a des volcans, la croûte terrestre est vraisemblablement très fissurée, en sorte qu'à ces endroits la masse ignée arrive à se rapprocher beaucoup plus de la surface extérieure que partout ailleurs.

Nous avons fait remarquer que, presque partout, les volcans se rencontrent dans le voisinage de nappes d'eau, mers ou lacs. L'importance de la présence de cette eau dans les phénomènes volcaniques tient sans doute à ce que par des fissures, existant

dans le fond des bassins, elle pénètre dans les profondeurs. Si cette eau parvient à des couches dont la température est de 365 degrés — qui est sa température critique —, elle ne peut plus exister à l'état liquide. Quoique transformée en vapeur, elle continuera quand même à pénétrer plus avant dans la profondeur si elle trouve un chemin. Quand elle aura atteint la masse ignée, elle sera absorbée par celle-ci avec une grande énergie. La raison en est qu'à partir de la température de 300 degrés, l'eau devient un acide plus puissant que même l'acide silicique. Celui-ci, qui est une des parties constituantes principales du magma formé surtout de silicates, sera déplacé de ses combinaisons par l'eau. Plus la température est élevée, plus sera grande la faculté du magma de fixer de l'eau.

La conséquence de cette fixation est que la masse va gonfler, en même temps qu'elle deviendra plus fluide. Elle sera expulsée, parce qu'il se produira une pression, que l'on peut comparer à la pression osmotique qui se manifeste lorsqu'une solution de sucre ou de sel absorbe une nouvelle quantité d'eau. Cette pression peut devenir extrêmement élevée, et atteindre des milliers d'atmosphères ! On comprend qu'elle forcera le magma à s'élever dans le conduit qui aboutit au cratère du volcan, même si celui-ci ne débouche dans l'atmosphère qu'à une altitude de 6 000 mètres.

Àmesure que ce magma s'élève dans la cheminée du volcan, il va se refroidir. Sa capacité pour retenir l'eau absorbée, diminuera avec la température. Cette eau va donc être libérée, avec accompagnement de violents bouillonnements ; elle entraînera dans son ébullition des gouttes de lave, ou même des masses plus importantes, et ce mélange retombera, une fois parvenu dans l'at-

mosphère, sous forme de pluie, de cendres, ou de ponces. La lave qui s'est écoulée sous la forme fluide, et qui se refroidit rapidement, continue à abandonner de la vapeur d'eau, et elle est ainsi déchirée en formant des laves en blocs.

Si, au lieu d'être expulsée dans une ascension violente, la lave arrive au cratère animée d'un mouvement lent, elle n'en abandonne pas moins de l'eau, mais très doucement. La surface du lac de lave étant longuement en contact avec l'atmosphère, lui abandonne toute l'eau qu'elle tient en excès, et quand elle commencera à se déverser, ses coulées présenteront, comme au Kilauea, des surfaces moins tourmentées, et même lisses et brillantes.

On a pu reconnaître que certains volcans n'ont pas dû se trouver situés à des endroits où la croûte terrestre a présenté des brisures, ou des solutions de continuité. Tel est le cas de certains volcans éteints de l'époque tertiaire en Souabe ou encore dans l'Afrique du Sud, près des célèbres mines de diamant. On se représente cependant aisément que le résultat du gonflement du magma que nous venons d'expliquer, est la production d'une pression si énorme, qu'elle peut forcer le passage à travers l'écorce, à des endroits où elle offrira une moindre résistance, par suite d'amincissement ou par d'autres causes, même sans qu'une brisure ou fissure antérieure fut nécessaire.

Continuons maintenant à considérer le magma intérieur du globe, et pénétrons plus avant dans la profondeur. Il n'existe pas de raison pour croire que la température cessera de croître à mesure que nous approcherons davantage du centre du globe. À des profondeurs de 3 ou 400 kilomètres, cette température atteindra une élévation telle, qu'aucun corps ne peut plus exister, sinon à l'état gazéiforme. À l'intérieur de l'enveloppe ayant cette épais-

seur tout le centre de la terre doit donc être gazeux. Seulement nous possédons certaines données sur ce que sont des gaz qui sont à la fois soumis à de fortes pressions, et élevés à des températures considérables. Ces données nous conduisent à admettre que le gaz de l'intérieur du globe est en fait un magma très peu fluide, qu'on pourrait, sous certains rapports, comparer à un corps solide. Sa compressibilité, en particulier, est excessivement faible.

On pourrait croire qu'il est impossible de rien savoir des propriétés de ces parties centrales. En effet ce n'est guère que par déduction que certains phénomènes, comme les tremblements de terre, nous ont fourni quelques indications à cet égard. Les parties dont nous parlons forment, en somme, de beaucoup la plus grande fraction du globe entier. Leur densité doit être très considérable, car la densité moyenne du globe est de 5,52, tandis que celle des couches extérieures, de l'enveloppe, comprenant les océans et les parties solides que nous avons sous les yeux, ont une densité bien moindre. Les roches ordinaires n'ont qu'une densité moyenne de 2,5 à 3. On a donc pu supposer que les parties intérieures du globe sont métalliques. Wiehert a tout particulièrement soutenu cette opinion, d'après laquelle le fer serait la principale partie constituante de la masse gazeuse centrale. Une circonstance particulière vient à l'appui de cette opinion : c'est que le fer est une des matières constitutives du soleil, les plus importantes, comme le prouve l'analyse spectrale. De même les pierres météoriques qui nous arrivent des espaces stellaires sont riches en métaux, mais particulièrement en fer. Enfin, dernier argument, le magnétisme terrestre nous révèle que certainement les régions profondes de la croûte terrestre doivent contenir des masses importantes de fer. On peut ajouter qu'il existe de sé-

rieuses raisons pour croire que le fer natif que nous rencontrons parfois, comme par exemple dans les masses connues d'Ovifak, au Groenland, seraient d'origine volcanique.

Les matières gazeuses qui se trouvent enfermées au centre de la terre se comportent donc, par suite de leur grande densité, et au point de vue physique et chimique, à peu près comme le feraient des liquides. Mais des métaux, tels que le fer, ont sûrement aux températures les plus élevées, un poids spécifique de beaucoup supérieur à celui de leurs oxydes ; de même ces oxydes sont plus denses que leurs silicates. Il faut donc en conclure que les gaz du centre même de la terre consistent presque exclusivement en métaux. Les parties périphériques au contraire sont formées d'abord d'oxydes, puis, plus extérieurement, de silicates.

Les parties extérieures du magma, qui pénètrent dans les couches superficielles, avec lesquelles elles sont en contact, sous forme de batholithes, se séparent probablement, par suite du refroidissement, en deux parties. L'une, plus légère, reprend la forme gazeuse, par suite de sa teneur en eau et en matières dissoutes. L'autre, plus dense, ne se compose guère que de silicates, combinés avec une quantité relativement faible d'eau.

La première partie, fortement aqueuse, pénètre dans les couches sédimentaires qu'elle rencontre, en remplit les interstices et les fentes, et les remplit de matières cristallisées, qui souvent ont pour nous une grande valeur, comme lorsqu'elles sont formées de dépôts stanniques, cupriques, ou d'autres minerais. L'eau s'évapore ensuite lentement à travers les couches superposées. La masse visqueuse des silicates se prend par contre en masses vitrifiées, ou, si le refroidissement est lent, comme par

exemple dans la formation des granits, en masses, formées de cristaux de petites dimensions.

Passons maintenant à l'étude des tremblements de terre. Aucun pays du globe n'est à l'abri de ces phénomènes. Ils ne se manifestent cependant que sous des formes absolument bénignes et sans présenter aucun danger dans les régions telles que des parages de la Baltique ou le Nord de la Russie. La raison en est que dans ces contrées la croûte terrestre n'a subi depuis de longues périodes géologiques aucun remaniement. Elle est restée en repos et elle n'a été fendillée par aucune cause. Un séisme, relativement important pour la région, a été constaté le 23 octobre 1904, particulièrement sur la côte occidentale de la Suède, et y fut considéré comme exceptionnellement violent. Il ne causa cependant point de dégâts dignes d'être mentionnés, — quelques cheminées seules furent jetées par terre. Il dut son origine à l'existence d'une faille, relativement importante pour les régions boréales, qui se trouve au large du Skagerrak. Elle est le prolongement du pli le plus profond qui existe sur le fond de la mer du Nord et qui est connu sous le nom de la « fosse norvégienne ». Elle contourne parallèlement les côtes de la Norvège.

En Allemagne, on ressent fréquemment des séismes dans le Vogtland de la Saxe. Il en est de même en Suisse. De toute l'Europe ce sont les contrées de l'Espagne, de l'Italie et de la Péninsule balkanique, puis encore du Karst autrichien, qui sont le plus fréquemment agitées par des tremblements de terre.

La British Association a créé un comité qui est spécialement chargé de l'étude des tremblements de terre. Ce comité a très grandement contribué aux connaissances que nous possédons sur ces phénomènes. D'après lui, tous les séismes importants se

groupent autour d'un certain nombre de centres bien définis, qui sont indiqués sur notre carte (fig. 10). La plus importante de toutes ces régions est celle qui est marquée F, et qui comprend l'Indochine, les îles de la Sonde, la Nouvelle-Guinée et le Nord de l'Australie. Dans cette région il s'est produit dans la période sexennale de 1899 à 1904, 249 tremblements de terre qui ont rayonné et qui ont été enregistrés par des observatoires souvent fort éloignés.

Ce centre sismique est très voisin d'un autre, marqué E sur la carte, qui a donné, pendant cette même période, 189 tremblements. Vient ensuite la région K très étendue où l'on a enregistré 174 séismes, et qui comprend les plis les plus importants dans la croûte de l'ancien continent. Elle s'étend des Alpes à l'Himalaya. Cette région est particulièrement intéressante, parce qu'elle donne des tremblements très fréquents, tout en ne comprenant presque exclusivement que des contrées continentales.

Les régions A, B et C, ont eu 125, 98 et 95 séismes. Elles sont voisines des grandes fractures de la croûte terrestre qui longent la côte du Pacifique et dans la mer des Antilles. La zone D, où l'on a compté 78 séismes, se trouve dans des conditions analogues.

Les régions que nous venons d'énumérer ont une importance sensiblement égale à la zone G qui comprend l'océan Indien. On y a compté 85 ébranlements du sol. Mais on en a enregistré 107 dans la région H, qui comprend l'Est atlantique.

Fig. 10. — Carte des principaux centres séismiques,
d'après les recherches de la British Association.

Mais les séismes de cette zone sont relativement faibles, et si l'on en a tant observé, c'est qu'un grand nombre d'observatoires se trouvent dans les pays avoisinants. Tel est encore le cas pour les zones I, devant

Terre-Neuve, et J, entre l'Islande et le Spitzberg, où l'on a compté 31 et 19 séismes. La région la moins fréquemment ébranlée parmi celles considérées comme soumises à ces phénomènes est le district L, qui avoisine le pôle Sud. On y a enregistré 8 séismes. Mais ce nombre minime tient sans doute à l'absence d'observatoires voisins. On a récemment ajouté aux précédentes une nouvelle région M qui s'étend au Sud Sud-Ouest de la Nouvelle-Zélande. On y a constaté le nombre considérable de 75 forts tremblements de terre, enregistrés entre le 14 mars et le 23 novembre 1905 ! Ils ont tous été ressentis par l'expédition scientifique de la Discovery à 70 degrés de latitude Sud et 178 degrés de longitude Est.

Les tremblements de terre ne sont, en général, pas isolés, mais se produisent par groupes. Ainsi en mars 1868, on a compté plus de 2 000 secousses dans l'île d'Hawaï. En 1870–1873 les environs de Phocis, en Grèce, ont été ainsi dévastés. On y a observé pendant longtemps des secousses qui se suivaient d'une façon ininterrompue, parfois à des intervalles de trois secondes seulement. On a estimé que pendant cette période, qui a duré trois ans et demi, il a dû y avoir environ 500 000 secousses et 250 000 bruits ou coups souterrains, non accompagnés d'ébranlements sensibles. De toutes les secousses, seulement 300 environ ont causé de réels dommages et 35 d'entre elles furent seules assez fortes pour être enregistrées par les journaux. En 1904, ces phénomènes se renouvelèrent, et un groupe de secousses furent ressenties du 10 au 28 octobre. Parmi elles celle du 23 octobre semble avoir été la plus notable, mais de nombreuses secousses de moindre importance se firent sentir, notamment le 24 et le 25.

À San-Francisco, en 1906, le séisme commença le 18 avril, à 5 heures 12 minutes 6 secondes du matin (heure du Pacifique). Il dura jusqu'à 5 heures 13 minutes 11 secondes, c'est-à-dire pendant 1 minute et 5 secondes. Mais pendant l'heure qui suivit, on nota 12 secousses plus faibles. De ce moment jusqu'à 6 heures 52 minutes du soir on en compta 19 autres. Enfin les jours suivants on enregistra encore diverses autres secousses beaucoup plus faibles.

Il arrive en général que quelques secousses faibles précèdent celles qui sont violentes et destructrices. Elles servent ainsi fréquemment d'avertisseurs. Mais tel n'est malheureusement pas toujours le cas. Les cataclysmes de Lisbonne en 1755, de Caracas en 1812, qui détruisirent ces deux villes, furent subites. De même ceux qui firent tant de ruines à Agram en 1880, et celui de San-Francisco, dont il vient d'être question. L'île d'Ischia fut ébranlée, assez faiblement, en 1881, sans secousses prémonitoires. Au contraire, en 1883, les secousses commencèrent faiblement, mais atteignirent une violence assez grande pour dévaster cette ravissante île. Il arrive en

Fig. 11. — Fentes produites par le tremblement de terre de San-Francisco, en 1906. Rue Valentia.

général aussi que le séisme principal est suivi par un certain nombre d'autres, plus faibles, comme en 1906 à San-Francisco et au Chili. Les séismes qui se réduisent à une seule secousse dévastatrice comme celui de Lisbonne en 1755 sont très rares.

Parmi les effets des tremblements de terre, on constate souvent l'existence de grandes fentes du sol. À San-Francisco on en trouva à plusieurs endroits. Une des plus remarquables a été vue à Midori, au Japon. Elle s'est produite au tremblement du

20 octobre 1891. Il en subsiste un « rejet » qui atteint jusqu'à 6 mètres de hauteur verticale et 4 mètres de déplacement horizontal. Elle n'a pas moins de 65 kilomètres de longueur ! Des fissures importantes ont été constatées en Calabre en 1783, au mont Sant'Angelo. De même au plateau gréseux de Bâlpakrâm, dans l'Inde, en 1897.

Souvent, dans des régions accidentées, il survient des chutes ou des glissements de montagnes, conséquences de la formation de fentes et des ébranlements. Le tremblement de la Phocide, dont il a été parlé plus haut, a causé la chute d'un nombre considérable de blocs rocheux près de Delphes. Une catastrophe ancienne, en Carinthie, a entraîné l'effondrement d'une montagne entière, celle de Dobratsch, faisant partie de l'Alpe de Villach. Le 25 janvier 1348 cette montagne ensevelit totalement deux villes et dix sept villages.

Le séisme du 18 avril 1906, en Californie, a eu pour point de départ une faille du sol qui part de l'embouchure de l'Alder-Creek, près de Arena Point. Elle court à peu près parallèlement à la ligne côtière, restant presque partout sur terre, mais passant sous l'Océan près de San-Francisco. On la retrouve sur terre plus au Sud entre Santa-Cruz et San-José, puis on la suit par Chittenden jusqu'au mont Pinos. Elle a ainsi une longueur totale d'environ 600 kilomètres. Sa direction est Nord 35 degrés Ouest à Sud 35 degrés Est. C'est le long de cette faille que les bords en ont glissé l'un sur l'autre. La portion qui se trouvait au Sud-Ouest s'est déplacée vers le Nord-Ouest d'environ 3 mètres, mais même par endroits jusqu'à 6 mètres. Dans quelques endroits, à Sonoma et dans le comté de Mendocino la tranche Sud-Ouest s'est quelque peu remontée par le glissement, mais nulle part plus de

1,20 m. Cette fissure ou faille est la plus longue qui ait jamais été observée comme suite d'un tremblement de terre.

Après un séisme, la surface terrestre ne reprend pas toujours son assiette ancienne, mais conserve une forme plus ou moins ondulée. Cet effet s'observe le plus aisément là où des routes ou des voies ferrées ont été affectées par le tremblement. On rapporte par exemple qu'à San-Francisco, les voies de tramway de Market-Street, une des principales rues de la ville, formaient comme de grosses vagues, tant elles étaient ondulées.

Les déplacements de l'écorce terrestre ainsi que les formations Fig. 12. — Cratères avec cônes de sable, et fentes, produites par le séisme de Corinthe en 1851. Des branches d'arbres émergent de l'eau d'inondation. des fentes ont des conséquences parfois notables. Des rivières ont quelquefois dû changer leur cours, des sources disparaissent et d'autres apparaissent. Ce fut le cas en Californie en 1906. Parfois les eaux souterraines se fraient violemment passage à travers le sol, amenant avec elles, à la surface, des sables, des boues et des pierres, formant ainsi des monticules dont la forme rappelle celle d'un cratère (fig. 12). Des inondations fort étendues en ont quelquefois été la conséquence. Un séisme de cette nature fut jadis la cause que l'ancienne Olympie fut noyée sous une couche de sables mouvants, qui recouvrit et préserva un grand nombre d'œuvres de l'art grec, — entre autres la statue très connue de l'Hermès d'Olympie. Ce flot s'écoula à son tour et les fouilles récentes ne présentèrent plus guère de difficultés.

Si les glissements qui se produisent dans les couches du sol font dévier ou disparaître les canaux naturels qui alimentent les sources, il n'est pas surprenant que les conduites d'eau artifi-

cielles soient brisées de même. Les dégâts qui en résultent, ainsi que les conséquences indirectes de ces ruptures sont, à l'occasion, fort graves. L'alimentation en eau n'existant plus, l'extinction des incendies qui éclatent presque toujours après la chute des édifices devient impossible. C'est ainsi que le feu dévaste en général ce que les secousses ont commencé à détruire, et tel fut le cas à San-Francisco et à Messine.

Comme la terre, les mers sont violemment ébranlées par les tremblements du sol. Le niveau en est soulevé en vagues puissantes. Nous avons déjà fait mention du raz de marée qui accompagna le tremblement de Lisbonne en 1755. Il se propagea en une vague gigantesque jusqu'aux côtes de Suède et de Norvège. En l'an 1510 un raz de marée de ce genre envahit les parties basses de Constantinople, jetant à terre 109 mosquées et 1 070 maisons d'habitation. Plus récemment, le 15 juin 1896, un séisme de l'île de Nippon (Japon) fut suivi d'un raz de marée qui se jeta sur la ville de Kamaishi, balaya 7 600 maisons et causa la mort de 27 000 êtres humains. À Messine, en 1908, des vagues envahissant le rivage ont causé d'importants dégâts.

Nous avons déjà parlé aussi de la vague que produisit le cataclysme du Krakatoa. Cette vague se propagea à travers tout l'océan Indien, passa le cap de Bonne Espérance ainsi que le cap Horn. Elle fit ainsi le tour complet du monde.

Nous pouvons ajouter que la marée atmosphérique qui eut son origine dans cette même éruption, fut peut-être plus étonnante et plus remarquable encore. En effet, on a constaté que les bruits les plus intenses, comme celui d'une très violente canonnade, s'entendaient au maximum jusqu'à une distance de 150 kilomètres. On connaît un seul cas, exceptionnellement favorable à

la transmission du son, où la distance d'audition a atteint 270 kilomètres. Mais l'éruption du Krakatoa fut entendue à Alice-Springs, à 3 600 kilomètres de distance, et même à l'île Rodriguez qui se trouve à 4 800 kilomètres ! Les barographes des diverses stations météorologiques enregistrèrent tout d'abord une hausse subite de la pression atmosphérique. Un abaissement considérable suivit immédiatement, puis encore une série d'oscillations faibles. Dans certaines stations ces effets de pression se répétèrent jusqu'à sept fois, d'où l'on a cru devoir conclure que la vague atmosphérique avait fait le tour entier de la terre, trois fois dans un sens et trois fois dans le sens opposé. On a pu mesurer la vitesse de propagation de cette marée de l'air ; on l'a trouvée égale à 314 m. 20 par seconde, ce qui est la vitesse théorique à une température de –27 degrés, correspondant sensiblement à une hauteur au-dessus du sol, de 8 000 mètres. Des vagues aériennes plus faibles produisent les bruits de souffle ou de froissement que l'on entend. Parfois des phénomènes lumineux sont signalés comme accompagnant les tremblements de terre. On les compare à des lueurs ignées ou à des aurores. Des perturbations magnétiques sont parfois produites — même à des distances considérables, — comme lors de l'éruption de la Montagne Pelée en 1902.

Depuis une dizaine d'années environ on a étudié très minutieusement un phénomène particulier qui est celui de la variation du pôle, ou de l'axe de rotation de la terre. Nos pôles se déplacent par rapport à leur position moyenne, en suivant une courbe tout à fait irrégulière. Ce déplacement est extrêmement faible ; le pôle Nord ne s'écarte pas de sa position moyenne de plus de 10 mètres. Mais on a cru faire cette observation, qu'à la suite de séismes violents le pôle subit de brusques déplacements, surtout

si plusieurs de ces séismes se suivent de près. S'il en est ainsi, le phénomène dont nous parlons fait comprendre, mieux que tout autre, la puissance des effets des tremblements, s'ils sont capables de déranger de son équilibre normal la masse entière du pesant globe terrestre.

Un dommage matériel qui a plusieurs fois été causé par des tremblements de terre, consiste dans la détérioration des câbles télégraphiques sous marins. On a plus d'une fois remarqué que la gutta-percha qui est toujours une des parties constituantes de ces câbles, a été fondue, ce qui semble prouver qu'il y a des éruptions volcaniques sous le fond de la mer. Depuis que ces faits ont été connus on évite avec soin, dans la pose des câbles, les régions qui sont des centres ordinaires de séismes, que les études les plus récentes ont fait connaître.

De tout temps on a été habitué à considérer comme connexes les phénomènes d'éruption volcanique et ceux des tremblements de terre. Il est hors de doute que cette connexité a existé dans un grand nombre de séismes. Pour le prouver le comité britannique que nous avons nommé plus haut, a établi la liste suivante d'un certain nombre de tremblements de terre aux Antilles.

1692. — Destruction de Port-Royal, à la Jamaïque. Une certaine étendue de terres disparaît dans la mer. Éruption du volcan de Saint-Kitts.

1718. — Très important tremblement à Saint-Vincent, accompagné d'une éruption du volcan de l'île.

1766–67. — Grands tremblements dans la partie Nord-Est de l'Amérique méridionale, à Cuba, à la Jamaïque et aux Antilles. Éruption de Sainte-Lucie.

1797. — Tremblement de terre de Quito : 40 000 victimes. Tremblements aux Antilles. Éruption à la Guadeloupe.

1802. — Violent séisme à Antigua. Éruption à la Guadeloupe.

1812. — Caracas, capitale du Venezuela, est complètement détruite par un tremblement. De violentes secousses sont ressenties aux États-Unis du Sud, à partir du 11 novembre.

1811. — Éruptions à Saint-Vincent et à la Guadeloupe.

1835–36. — Violents tremblements au Chili et dans l'Amérique centrale. Éruption à la Guadeloupe.

1902. — Le 19 avril, violentes secousses, qui détruisent de nombreuses villes du Centre-Amérique. La Montagne Pelée entre en activité. Le 3 mai, éruption de celle-ci. Destruction des câbles sous-marins avoisinants. La mer se retire. Le 7 mai, éruption à Saint-Vincent : destruction des câbles. Nouvelles et importantes fluctuations de la mer le 8, 19 et 20 mai. Le 8 mai, violente éruption de la Montagne Pelée et destruction de la ville de Saint-Pierre. Nombreux séismes moins importants.

Cette énumération fait saisir combien l'instabilité de cette région de la terre est grande, et combien notre vieille Europe est en repos, surtout dans sa partie nord. Il y a des régions de l'Amérique centrale qui sont si fréquemment secouées par des tremblements qu'on a été jusqu'à donner au Salvador le nom de « hamac ». On n'exagère pas beaucoup en disant que le sol y est dans un état de trépidation continue.

Il est d'autres contrées encore qui sont très fréquemment visitées par ces cataclysmes, comme par exemple les îles Kouriles et le Japon, et comme encore les Indes occidentales. Dans tous ces

pays la croûte terrestre a été brisée pendant des périodes géologiques récentes, et notamment à l'époque tertiaire. Des fentes nombreuses se sont produites à ce moment ; elles ont formé des replis, et leur refermeture dure encore. Les petits séismes, — et on ne compte pas moins de 30 000 de ceux-ci par an, — n'ont pas de relation directe et étroite avec les éruptions volcaniques. Il peut en être de même pour certaines secousses plus puissantes, comme par exemple celle de San Francisco.

On cite encore une autre cause qui sans doute peut produire certains tremblements de terre. Le fond de la mer a souvent une pente rapide. Si, près de là, il existe des dépôts sédimentaires, amenés par les rivières dans le cours des temps, il peut y avoir, à un moment donné, des glissements de masses fort considérables. D'après Milne, le séisme du 15 juin 1896, à Kamaishi, aurait eu cette origine.

Enfin on est fondé à croire que même les inégalités de la pression atmosphérique entre des régions voisines, dont l'effet est de charger différemment par endroits la croûte terrestre, peuvent favoriser la production des tremblements de terre.

Il existe quelques contrées où l'on ne se préoccupe pas de séismes, et où cependant il s'en produit souvent. Telle est par exemple la région de Vienne en Autriche, où il se produit, dans les environs, des mouvements du sol fréquents, et parfois même assez importants. Sur la carte de la figure 13, on remarquera trois lignes, qui correspondent probablement à d'importantes fentes du sous-sol, et qui sont connues pour être les foyers de nombreux mouvements de la surface.

La première de ces lignes, marquée AB (fig. 13), est connue sous le nom de « Ligne des Thermes » (Thermallinie). Elle marque la série de nombreuses sources chaudes balnéaires qui sont : Meidling, Baden, Vöslau et d'autres encore. Ces sources sont employées comme thermes médicinaux.

Une seconde ligne CD porte le nom de ligne de la Kamp, d'après la petite rivière dont elle suit en partie le cours. La troisième enfin est la ligne de la Muerz, également du nom d'une rivière. La ligne de chemin de fer Vienne-Bruck suit les vallées AB et EF.

Ces trois lignes se rencontrent dans les environs de Wiener-Neustadt. Ce point est le centre de nombreux ébranlements du sol, dont un certain nombre sont indiqués sur la carte par le millésime où ils se sont produits. Une autre courbe, marquée XX, indique le contour d'une zone où se firent sentir les effets d'un séisme du 3 janvier 1873. Il s'étendit à droite et à gauche de la ligne de la Kamp, et on remarquera combien, au milieu de la longueur de cette ligne, la région intéressée s'étendit à

Fig. 13. — Lignes sismiques de la Basse-Autriche.

droite et à gauche, où les terrains superficiels étaient sans consistance : c'est la plaine entre Sankt-Pölten et Tulln. Au contraire, vers le Nord-Ouest et vers le Sud-Est, il existe des masses montagneuses qui ont limité nettement l'étendue du séisme.

On a fait des observations analogues lors du tremblement qui a désolé la ville de Charleston, aux États Unis, en 1886. Il fit 27 victimes et il était considéré comme le plus violent séisme connu dans l'Amérique du Nord, avant 1906. La ville est voisine des monts Alleghany, qui ont fait un obstacle puissant contre l'extension de la secousse. La vallée du Mississipi, au contraire,

avec ses terrains alluvionnaires, a permis leur transmission avec une beaucoup plus grande facilité. — À San-Francisco, on a observé que les plus grandes ruines se sont produites dans les quartiers construits sur un sol meuble, dans le voisinage du port. Les quartiers situés plus haut sur le dos d'âne rocheux de la ville supérieure sont restés comparativement indemnes ; le feu y a fait ultérieurement plus de ravages que les secousses. L'étude des effets de ce séisme au point de vue destructif a permis de faire du sol de cette ville quatre catégories, savoir : 1 sol rocheux ; 2 vallons situés entre des massifs rocheux mais remblayés peu à peu, et naturellement ; 3 dunes sableuses ; 4 remblais artificiels. Ce dernier terrain s'est comporté, suivant l'expression de la Commission qui a été chargée de grouper tous les renseignements sur ce cataclysme. « comme une gelée semi-liquide dans une coupe ».

On conçoit que dans ces conditions les « Sky scrapers », ou bâtiments à nombreux étages, qui sont construits avec une ossature en acier, et dont les fondations sont descendues jusqu'au sol rocheux, aient le mieux résisté. Après eux viennent les maisons bâties en briques et ciment, posées sur un bon sol profond. Les maisons en bois se sont montrées insuffisantes par suite de l'absence de sérieux assemblages horizontaux. Mais la bonne résistance des bâtiments à ossature métallique est facilement reconnaissable à l'inspection de la figure 14.

Les dégâts les plus importants du séisme de San-Francisco se sont produits sur le trajet même de la fissure dont nous avons parlé, p. 28. Furent également très éprouvées les localités de Santa-Rosa, San-José et Palo-Alto. Ces localités, comme aussi l'Université de Stanford, sont bâties sur le sol meuble de la vallée qui

aboutit à la baie de San-Francisco. Par contre la
Fig. 14. — Bâtiment (bibliothèque) faisant partie de l'Université Stanford, en Californie, après le tremblement de 1906. On voit la résistance considérable offerte au séisme par la construction métallique, comparée à celle des maçonneries non armées. Pour la résistance des bâtiments en bois, voir la figure 11. riche Université californienne de Berkeley et l'observatoire de Lick, connu dans le monde entier, n'ont heureusement subi pour ainsi dire, aucun dommage. L'un et l'autre sont établis directement sur des sols de fondation rocheux.

Pour revenir aux contrées des Calabres et de la Sicile, nous donnons ici une carte (fig. 15) reproduite d'après Suess. Ces régions ont été maintes fois dévastées par des séismes importants. Celui de 1783 a été un des plus terribles, puis celui du 28 décembre 1908. Mais très fréquemment des secousses de plus faible importance font trembler le sol.

C'est à une époque relativement récente que le fond de la mer Tyrrhénienne s'est affaissé et il continue, aujourd'hui encore, à s'enfoncer sous les flots. On remarquera sur la carte cinq lignes pointillées qui se trouvent sur l'emplacement de fissures reconnues de la croûte solide. Elles font intersection dans la région qui avoisine les îles Éoliennes. On remarquera encore une bande circulaire, légèrement hachurée, qui correspond également à une fissure d'où partirent les secousses des deux tremblements sus indiqués. La croûte terrestre se comporte ici un peu comme un carreau de vitres qui, serti au pourtour, serait brisé par un coup central, produit aux environs de l'île Lipari. De ce centre rayonnent les nombreuses lignes de fracture indiquées, et les

fragments détachés des parties fixes environnantes le sont circulairement suivant la bande hachurée.

L'Etna se trouve précisément à l'intersection de la fracture circulaire et d'une des lignes rayonnantes.

L'importance et le grand intérêt pratique que présente l'étude des tremblements de terre a conduit, dans ces derniers temps, à l'établissement d'un grand nombre d'observatoires séismologiques. On y enregistre tous les mouvements vibratoires du sol au moyen de pendules qui inscrivent leurs déplacements sur des bandes de papier qui se déroulent. Lorsqu'aucun mouvement ne se manifeste, la ligne ainsi inscrite est une droite. Quand une secousse se produit, la ligne devient sinueuse. Si le mouvement du papier est très lent, ces sinuosités se confondent et on semble n'avoir qu'une ligne épaissie. La figure 16 est la reproduction d'un de ces enregistrements de trépidations, obtenu à Shide, dans l'île de Wight, le 31 août 1898. Il se rapporte à un séisme qui s'est produit dans la région G de la carte (fig. 10), c'est-à-dire dans l'océan Indien. On y remarque un

Fig. 15. — Lignes des séismes dans la région d'affaissement Tyrrhénienne. premier élargissement de la ligne à 20 heures 5 minutes 2 secondes. La ligne s'est élargie de plus en plus, et les déviations les plus fortes, correspondantes aux secousses les plus intenses,

Fig. 16. — Séismogramme, relevé à Shide, dans l'île de Wight, le 31 août 1898. furent enregistrées à 20 heures 36 minutes 25 secondes et à 20 heures 42 minutes 29 secondes. Elles diminuèrent ensuite lentement.

On donne le nom de préphase au commencement de l'ébranlement, à 20 heures 5 minutes 2 secondes. Celui-ci a suivi une

trajectoire directe à travers le noyau du globe, et on a reconnu que sa vitesse de translation est de 9,2 km. par seconde. Elle parcourt le diamètre entier du globe en 23 minutes. Elle est toujours très faible, ce qu'il faut attribuer au frottement très considérable des matières traversées, ainsi que cela se produit dans les gaz fortement surchauffés qui occupent le centre du globe. Le fort ébranlement enregistré à 20 heures 36 minutes 25 secondes marque un mouvement de la croûte solide du globe. Cette secousse est beaucoup moins affaiblie par la transmission que la précédente. Sa vitesse de translation est moindre aussi ; elle n'est que de 3,40 km. par seconde le long de la surface terrestre.

On peut calculer la vitesse de translation d'un choc à travers une masse homogène de quartz. On la trouve égale à 3,60 km. par seconde, c'est-à-dire sensiblement concordante à celle donnée par l'expérience. Cela doit, en effet, être le cas, car la croûte du globe est formée principalement de silicates, c'est-à-dire de combinaisons quartzifères, dont les propriétés se ressemblent.

La vitesse de translation à des distances relativement petites est moins grande ; on n'y observe pas toujours la préphase faible. Elle descend jusqu'à 2 kilomètres par seconde. Il faut en chercher la raison dans ce que la propagation de la secousse se fait par une trajectoire courbe qui passe par les couches plus profondes et plus solides, ou encore parce qu'elle passe par des couches plus hétérogènes et plus brisées qui la transmettent beaucoup plus lentement que les masses homogènes. Ainsi, dans du grès peu consistant, la vitesse est de 1,2 km., dans l'eau 1,4 km. et dans du sable meuble 0,3 km. par seconde.

On conçoit qu'à l'aide de l'enregistrement de l'heure d'arrivée de la première secousse et de la secousse principale, on puisse

calculer la distance entre le lieu de l'observation et le centre du tremblement. Parfois on observe que la forte secousse se répète en s'inscrivant à nouveau au bout de quelque temps, un peu affaiblie. Cette deuxième inscription semble indiquer que la propagation a suivi le chemin le plus long autour du globe entre le lieu d'émission et celui de l'enregistrement. Ce phénomène est le même que celui de la propagation de l'onde atmosphérique observée lors de l'éruption du Krakatoa (voy. p. 31). La vitesse de translation est la même pour les deux inscriptions.

Les observations enregistrées par M. Milne l'ont conduit à cette conclusion que si la ligne droite qui joint le centre du séisme au point d'enregistrement ne passe pas à plus de 50 kilomètres au-dessous de la surface de la terre, la secousse est transmise en entier par la croûte solide. Il en conclut à une épaisseur moyenne de cette croûte, égale à 50 kilomètres, ce qui est une remarquable concordance avec l'épaisseur déduite de la considération des températures (voy. p. 18). Il est intéressant d'ajouter que l'on a déterminé, à l'aide d'observations du pendule, la densité de la croûte dans le voisinage des stations. On a cru pouvoir en conclure que jusqu'à 50 ou 60 kilomètres cette densité est très variable, et qu'elle ne devient uniforme qu'à partir de cette profondeur. Ces 50 à 60 kilomètres seraient encore la mesure de l'épaisseur de la croûte terrestre.

L'étude des secousses que subit le sol conduit ainsi à cette conclusion que nos hypothèses sur l'épaisseur peu considérable de la croûte solide et sur la nature gazeuse du noyau central doivent se rapprocher beaucoup de la réalité. Nous pouvons espérer que des études approfondies des séismogrammes nous feront connaître encore bien des choses sur l'état des parties plus

profondes du globe, de celles qu'une étude moins critique pourrait faire considérer comme complètement inaccessibles aux recherches scientifiques.

02

Il est peu de spectacles plus impressionnants que celui de la voûte céleste, quand on la contemple par une nuit bien pure, avec ses milliers d'étoiles. Si l'on dirige la pensée vers ces luminaires qui semblent distants à l'infini, la question se pose involontairement de savoir s'il y a encore d'autres globes analogues au nôtre, qui puissent servir de séjour à des êtres vivants et organisés. L'intérêt que nous présente une île déserte et morte des régions circumpolaires où il n'y a pas la moindre plante, est nul, comparé à celui qu'éveille une terre quelconque des tropiques, où la vie se développe dans sa diversité magnifique. De même l'intérêt que nous éprouverons pour un monde lointain sera tout autre si nous pouvons le supposer animé, que si nous sommes obligés de nous borner à le considérer comme une masse inerte et morte, qui flotte dans un espace indéfini.

Des questions tout semblables se présentent à notre esprit en pensant à la terre. Fut-elle, de tout temps, revêtue de sa tunique de verdure vivante, ou bien y eut-il une époque où elle fut stérile et vide ? Et s'il en fut jamais ainsi, quelles sont les conditions qui l'ont appropriée à sa haute destinée actuelle où elle est le séjour d'êtres vivants ? Que notre globe fut, à un certain moment, « vide et sans forme », cela n'est pas douteux, soit que nous admettions qu'elle était entièrement à l'état de matière fondue, — ce qui

semble le plus probable —, soit qu'elle doive sa formation à une agglomération de pierres météoriques, comme l'ont supposé Lockyer et Moulton, pierres qui, arrêtées dans leur fuite à travers l'espace, seraient devenues incandescentes.

Ainsi que nous l'avons précédemment indiqué, il est probable que la terre est formée d'une masse gazeuse, enveloppée à sa périphérie par une croûte solide, dont la partie intérieure est à l'état de liquide pâteux. On admet en général, en se basant sur de solides raisons, que, primitivement, la terre s'est séparée du soleil à l'état d'un amas gazeux sphérique. C'est là, encore aujourd'hui, l'état du soleil. Par suite du rayonnement de sa chaleur vers les espaces célestes, cette sphère, très analogue, sous beaucoup de rapports, au globe solaire, a perdu petit à petit sa haute température. Une couche solide s'est ainsi formée à sa surface. Lord Kelvin a calculé qu'il n'a pas fallu beaucoup plus de cent ans pour faire tomber la température de la surface, à 100° C. Lors même que ce calcul ne serait pas absolument exact, nous pouvons néanmoins affirmer qu'entre le moment où la croûte terrestre était à 1 000 degrés, ce qui a dû correspondre au début de sa solidification, et celui où elle n'avait plus, à sa surface, que 100 degrés, il ne s'est passé que peu de milliers d'années. Aucun être vivant ne saurait, naturellement, exister à cette dernière température, attendu qu'elle suffit pour coaguler l'albumine des cellules, comme celle d'un œuf de poule. On affirme toutefois que certaines algues, que l'on trouve dans des sources chaudes de la Nouvelle-Zélande, y vivent par une température de 80 degrés. Ayant eu occasion de visiter le Yellowstone-Park, aux États-Unis, j'ai cherché si je trouverais à y vérifier l'exactitude de ce fait. J'ai seulement vu certaines de ces algues sur les bords de sources bouillantes, où 60 degrés était à peu près un maximum. De son côté, le célèbre

physiologiste américain Loeb affirme que si les sources dépassent 55 degrés de température, on n'y trouve plus aucun de ces végétaux.

Entre l'abaissement de température de 100 degrés à 55 degrés il s'est certainement écoulé beaucoup moins de temps qu'entre 1 000 degrés et 100 degrés. On peut donc être certain qu'à partir de la formation de la première croûte solide de notre globe jusqu'au moment où est arrivée une température favorable à l'existence d'êtres organisés, il ne s'est pas écoulé beaucoup de milliers d'années. Il est peu probable que depuis lors la surface terrestre se soit jamais assez refroidie pour priver plus d'une faible partie de ses êtres vivants Il y a eu, il est vrai, des périodes glaciaires pendant lesquelles les surfaces polaires inaccessibles à la vie, avaient une beaucoup plus grande étendue qu'aujourd'hui. Mais l'océan a toujours été, dans sa plus grande partie, libre de glaces, et a pu, conséquemment, être le siège de la vie organique. Le centre du globe continue sans cesse à se refroidir, bien qu'avec une extrême lenteur, sa chaleur se répandant à travers la croûte solide, de l'intérieur vers l'extérieur.

Par suite de quelles circonstances la surface du globe a-t-elle pu devenir le siège de l'existence d'êtres vivants ? C'est uniquement parce que le rayonnement de sa chaleur vers l'espace l'a refroidie jusqu'à une température appropriée, inférieure à 55 degrés, pas assez, toutefois, pour que l'océan ait pu se congeler, ni que les continents arrivent à des températures inférieures à zéro. Cet état moyen provient de ce que le rayonnement solaire agit sans cesse ; qu'il compense la perte continue de chaleur de la terre, et qu'il suffit à maintenir au-dessus de zéro, la presque totalité de la surface du globe. La condition essentielle à l'existence

de la vie sur une planète quelconque est évidemment celle-là : qu'il lui soit fourni de la chaleur et de la lumière en quantité suffisante pour compenser son inévitable rayonnement vers l'espace indéfini de l'univers. Si ce gain et cette perte de chaleur ne s'équilibraient pas, la vie n'aurait qu'une durée extrêmement limitée. La température de notre surface terrestre a mis peu de siècles ou peu de milliers d'années pour tomber de 1 000 degrés à 100 degrés parce que pendant cette période le rayonnement dépassait l'apport de chaleur venu du soleil. Par contre, semble-t-il, d'après une estimation faite par Joly, il a dû se passer environ 100 millions d'années depuis que l'océan a pu se condenser à la surface du globe. C'est cet immense espace de temps qui a dû s'écouler pour que la température tombât de 365 degrés à celle d'aujourd'hui. Ce n'est qu'à 365 degrés, température critique de l'eau, que la vapeur peut subir un commencement de condensation. À partir du moment où ce degré fut atteint la différence entre le rayonnement émis et la chaleur reçue diminuant de plus en plus, le refroidissement se trouva retardé.

L'estimation de Joly est basée sur le degré de salure de l'océan et celui des fleuves. Si l'on cherche quelle est la quantité de sel aujourd'hui contenue dans les eaux de la mer, et qu'on la compare à celle qui lui est apportée d'une manière constante par les fleuves qui s'y jettent, on trouve qu'il a fallu environ cette durée de 100 millions d'années pour en faire l'apport.

On arrive à des chiffres bien plus élevés si l'on essaie de calculer le temps nécessaire pour déposer toutes les couches stratifiées ou celles dites sédimentaires de l'écorce de notre globe. Sir Archibald Geikie, le grand géologue écossais, estime l'épaisseur totale de ces dépôts à 30 000 mètres. Il suppose toutefois, pour faire

cette évaluation, qu'elles n'ont pas été remaniées. L'examen de couches relativement récentes lui a permis d'estimer que chaque épaisseur d'un mètre a demandé un temps variant entre 3 000 et 20 000 années. Le dépôt de l'ensemble de ces couches aurait donc demandé une durée comprise entre 90 et 600 millions d'années.

On peut asseoir ces estimations sur d'autres bases. Pendant qu'à la surface du globe il y a compensation entre la chaleur reçue du soleil et rayonnement vers les espaces célestes, le centre continue à perdre de la chaleur, à se refroidir. Ce refroidissement est cause d'une contraction de la masse centrale. On peut s'assurer de cette contraction par la formation des chaînes de montagnes, dont la superficie totale est, d'après Rudzki, de 1,6 p. 100 de la surface terrestre. Il en conclut que le rayon de la terre s'est raccourci de 0,8 p. 100 depuis le commencement de leur formation. Cette contraction correspond à un refroidissement d'environ 300 degrés, ce qui demanderait environ 2 000 millions d'années.

Une autre méthode d'évaluation très remarquable a été imaginée tout récemment par le célèbre chimiste et physicien Rutherford, dans le but d'évaluer l'âge de certains minéraux. On sait aujourd'hui combien une quantité donnée d'urane ou de thorium laisse émaner d'hélium en l'espace d'une année. Les minéraux que l'on trouve et qui contiennent ces corps sont pour le premier, la fergusonite, et pour le second, la thorianite. Ramsay a déterminé, pour l'un comme pour l'autre, leur contenu en hélium. De ces proportions Rutherford a cru pouvoir conclure à une durée d'au moins 400 millions d'années depuis leur formation, tout en admettant que depuis ce moment, et malgré leur séjour dans le sein

des roches, une certaine quantité d'hélium a dû s'en échapper. Bien que cette détermination laisse subsister encore beaucoup d'incertitudes, il n'en est pas moins d'un grand intérêt de voir qu'elle conduit à l'estimation d'une durée de même ordre que celle déduite des autres méthodes.

Pendant toute cette période d'une durée si énorme, presque inconcevable pour nous, variant, suivant le mode d'estimation, de 100 à 2 000 millions d'années, il a dû exister, tant sur la surface de la terre ferme que dans l'océan, des êtres organisés, qui ne sont, après tout, pas très différents de ceux qui vivent encore aujourd'hui. Il faut donc bien admettre que, si la température périphérique était, au début de ces temps reculés, un peu plus élevée que celle de nos jours, la différence n'est pas énorme. Elle peut être estimée à 20 degrés au plus.

La température moyenne actuelle est d'environ 16 degrés. Elle varie de –20 degrés au pôle Nord, –40 degrés au pôle Sud, à près de +26 degrés dans le voisinage de l'équateur. Les recherches des géologues nous ont fait connaître les plus anciennes périodes où il a existé des êtres vivants. Elles nous ont appris qu'il y avait une différence marquée entre la température d'alors et la nôtre. Mais il semble que jadis la chaleur était presque uniforme sur tout le globe, tandis que de nos jours il existe des différences que tout le monde connaît entre les différentes zones du globe.

L'uniformité de chaleur, qui semble avoir duré longtemps, provenait de l'égalité presque absolue entre le gain de la croûte terrestre par l'échauffement solaire, et la perte par radiation. Il ne peut y avoir aucun doute que pour l'existence de la vie, un apport de chaleur envoyée par un corps céleste de haute température est absolument nécessaire. On se rend moins facilement

compte qu'une perte de chaleur par rayonnement vers les espaces froids qui nous entourent est non moins inéluctable. Pour certaines personnes ce fait est même si peu établi qu'elles ne l'admettent que sous une forme spéciale. La chaleur de la terre, aussi bien que celle du soleil, ne se perdrait pas vers l'espace, mais cet échange n'aurait lieu qu'entre corps célestes. Toute la chaleur émise par le soleil le serait ainsi au bénéfice des planètes et de leurs satellites, qui forment le système solaire. Une partie infinitésimale seule serait perdue en se rendant aux autres étoiles fixes. Si ce point de vue était vrai, la température des planètes devrait forcément s'élever très rapidement, jusqu'à égaler presque celle du soleil lui-même. Toute vie organique aurait vite disparu. Il faut donc bien admettre que les choses « sont bien comme elles sont », quoique l'énorme gaspillage de la chaleur du soleil constitue un affaiblissement constant de l'énergie qui s'y trouve emmagasinée.

Du reste, la notion que la chaleur solaire est perdue parce qu'elle rayonne vers les espaces infinis, procède d'une supposition qui n'est soutenue par aucune preuve et qui est même fort improbable. Elle admet qu'une fraction minime du firmament est seule garnie de corps célestes. Cela ne serait vrai que si, comme on le supposait autrefois, tous ces corps étaient lumineux. Or, nous ne possédons aucun moyen de juger du nombre et de la dimension des étoiles obscures. On a bien supposé, pour expliquer le mouvement reconnu de certaines étoiles lumineuses, qu'il y avait dans leur voisinage d'autres corps obscurs, de dimensions considérables. Leurs masses seraient comparables à celle de notre soleil, si elles ne la dépassent pas. Mais de beaucoup le plus grand nombre de ces corps obscurs qui empêchent les rayons d'autres étoiles plus lointaines de venir jusqu'à nous, sont proba-

blement de dimensions plus petites, comme celles que nous observons dans les comètes et les météores. La plus grande partie même n'est sans doute que de la poussière cosmique. Les études et les observations des années les plus récentes, faites à l'aide d'instruments très puissants, ont en effet révélé que les étoiles nébuleuses et les nébuleuses proprement dites sont extrêmement nombreuses.

D'après une estimation due à M. Charlier, de Lund, l'ensemble des étoiles répandues sur la voûte céleste donnerait une lumière environ trois mille fois plus forte que celle d'un astre de première grandeur. Or la puissance lumineuse du soleil a été évaluée à cent milliards de fois celle de cette même étoile. Elle serait donc trente millions de fois celle de l'ensemble des étoiles réunies. Si toutes les étoiles avaient, par unité de surface, la même clarté que le soleil, leur lumière aggrégée ne serait pas plus forte que celle d'une étoile unique qui aurait 0,4 de seconde d'arc de diamètre. On sait que le soleil a un diamètre de 1 920 secondes.

Que l'on se rappelle maintenant qu'une seule nébuleuse planétaire, le n 5 du Catalogue d'Herschel, située près de B de la Grande Ourse, a un diamètre d'environ 160 secondes d'arc. Elle a par conséquent une surface plus de cent mille fois supérieure à l'ensemble de toutes les étoiles fixes, visibles même au télescope. Le nombre de celles-ci a été estimé par Lord Kelvin à un milliard. D'autres nébuleuses, les irrégulières, sont encore bien plus grandes, comme par exemple la grande nébuleuse d'Orion. Quoique d'une grande ténuité, ces nébuleuses peuvent cependant affaiblir la lumière des étoiles les plus faibles. Mais le plus grand nombre des nébuleuses semble devoir être trop peu lumineux pour que nous puissions les apercevoir. Toutes ces nébuleuses si

nombreuses sont des lieux où sont attirées les poussières cosmiques restées errantes dans l'espace. Elles y pénètrent et s'y trouvent sans doute retenues, après quoi elles se concentrent dans les parties centrales des nébuleuses devenues planétaires, par suite de la gravitation.

On se trouve ainsi naturellement conduit à cette conclusion que le vaste univers doit être partout rempli de corps célestes, à peu près autant que l'est le voisinage immédiat de notre système solaire. Qu'en résulte-t-il ? C'est que tout rayon émis par le soleil, où qu'il soit dirigé, rencontrera quelque corps céleste, de sorte qu'aucun n'est perdu. Il doit en être de même de la lumière répandue dans l'espace par les autres étoiles.

Sous certains rapports, on pourrait comparer notre globe à une machine à vapeur. On sait que celle-ci, pour produire un travail utile, doit recevoir d'une source quelconque, c'est-à-dire du foyer, par l'intermédiaire de la chaudière, la chaleur nécessaire. Mais elle doit à son tour céder cette chaleur à un corps dont la température est plus basse, savoir : au condenseur. Ce cycle de l'échauffement et du refroidissement est indispensable pour qu'il puisse être recueilli du travail.

Il en est de même de la terre. Aucun travail utile ne peut s'y produire, ni par conséquent aucune vie, si elle ne remplit pas la fonction d'un organe intermédiaire pour la réception de la chaleur provenant du soleil, et sa dispersion vers un entourage plus froid, vers l'espace céleste et les corps froids qui y circulent.

Ainsi que nous le verrons tout à l'heure, la température de la surface de notre globe dépend jusqu'à un certain point de la na-

ture de l'atmosphère qui l'environne, et plus particulièrement de la transparence de celle-ci à l'égard des rayons calorifiques.

Si la terre n'avait point d'atmosphère, ou encore si celle-ci était parfaitement transparente, on pourrait très facilement calculer la température moyenne de la surface terrestre. Une loi, formulée par Stefan, lie en effet entre elles la radiation et la température d'un corps rayonnant. Christiansen a fait le calcul en partant de ce fait, qu'un corps obscur, d'un centimètre carré de surface, situé à une distance du soleil égale à la distance moyenne de notre terre, reçoit de lui, par minute, deux calories et demie. Il a déterminé sur ces bases la chaleur moyenne qui doit exister à la surface de toutes les planètes de notre système. Le tableau suivant résume ces résultats, auxquels nous avons cru intéressant d'ajouter quelques autres données numériques ; la distance de chaque planète au soleil est donnée en rayons de l'orbite terrestre, que l'on évalue aujourd'hui à 149,5 millions de kilomètres.

Parmi ces planètes, Mercure présente cette particularité de toujours offrir au soleil la même face hémisphérique. C'est pourquoi on trouve dans le tableau ci-dessus le chiffre 332 degrés entre parenthèses, qui représente la température moyenne de ladite face. Son point le plus chaud doit atteindre 397 degrés, tandis que, par contre, sa face opposée, toujours dirigée vers l'espace, doit avoir une température peu éloignée de –273 degrés, qui est le zéro absolu.

J'ai fait le même calcul pour la lune, dont la rotation autour de son axe, — en 27 jours —, est si lente, que la température de la face éclairée s'élève beaucoup. Elle doit être très voisine de celle qu'elle aurait si la même face était invariablement opposée au soleil. Cette température serait alors de 106 degrés, et son point le

plus chauffé atteindrait environ 150 degrés. Par contre, les pôles de notre satellite, tout comme la face qui, pendant la même durée de 27 jours, est privée de la lumière solaire, doivent à peine dépasser le zéro absolu.

Ce résultat concorde d'ailleurs d'une façon très satisfaisante avec les mesures calorimétriques qui ont pu être faites. La plus ancienne de ces mesures est de Lord Rosse. Il trouva que la surface de la pleine lune, complètement éclairée par le soleil, rayonnait autant de chaleur qu'un corps obscur qui aurait 110° C. Une répétition de ces mesures, faite par le savant américain Very, a indiqué que le point le plus réchauffé de la surface lunaire devait avoir environ 180 degrés, c'est-à-dire environ 30 degrés de plus que ne l'indique le calcul. Notre satellite, comme la planète Mercure, n'a pour ainsi dire point d'atmosphère, et il est probable que le chiffre donné par le calcul approche beaucoup de la réalité.

En ce qui concerne Vénus, si son atmosphère est parfaitement transparente, sa surface doit être à bien près de 65 degrés. Nous savons toutefois que des nuages épais flottent dans cette atmosphère, nuages probablement formés par des gouttes d'eau, qui nous empêchent de voir la croûte solide ou les océans de la planète. Des observations de Zöllner et d'autres sur la luminosité semblent indiquer que ces nuages renvoient environ 76 p. 100 de la lumière solaire qu'ils reçoivent. En d'autres termes la planète nous apparaît à peu près aussi blanche qu'une boule de neige. Les rayons calorifiques ne sont pas renvoyés dans une proportion aussi élevée. On peut évaluer à la moitié environ de la chaleur reçue, celle qui est absorbée. Cela suffit pour que la température soit notablement diminuée, bien que, d'autre part, cette atmosphère protectrice retienne aussi une certaine portion de la cha-

leur, sans la laisser rayonner. Mais la température moyenne est certainement beaucoup moins forte que celle de notre tableau, et oscille sans doute autour de 40°. Il n'est donc nullement absurde de croire que de notables parties de la surface de Vénus sont favorables à la vie organique, et parmi elles tout particulièrement celles qui environnent les pôles.

La température de notre globe est, elle aussi, fortement influencée, c'est à dire diminuée, par l'existence des nuages. Ils protègent environ 52 p. 100 de la surface totale contre la radiation solaire. Mais, même par le ciel le plus clair, la totalité de la lumière du soleil n'arrive pas jusqu'au sol. L'air le plus pur contient toujours quelque peu de poussière extrêmement divisée. J'ai essayé une évaluation des effets produits par cette poussière et j'ai trouvé qu'elle nous fait perdre environ 17 p. 100 de la chaleur solaire. Les nuages et les poussières réunis nous retireraient environ 34 p. 100 de la chaleur qui nous arrive. Cela correspond à un abaissement de température de 28 degrés ! Mais par contre cette même poussière, comme les nuages, empêche également le rayonnement, en sorte que, somme toute, la perte qu'elles nous causent peut s'évaluer à 20° c.

Or on a constaté que la température moyenne de la surface terrestre est de 16 degrés et non de 6°,5 comme le voudrait le calcul, et ces 6,5 degrés devraient encore subir le retranchement des 20 degrés dus à l'influence des nuées et des poussières. Il ne resterait donc que –14 degrés, c'est-à-dire 30 degrés de moins que la température moyenne réelle.

Cette différence est due tout entière à l'effet protecteur des gaz qui constituent notre atmosphère, ainsi que nous le montrerons un peu plus loin (p. 56).

Mars n'a pour ainsi dire pas de nuages. Son atmosphère est extrêmement transparente, et cela explique sa température élevée. Au lieu de celle calculée de –37 degrés, il est en réalité à environ 15 degrés au-dessus de zéro. On peut s'en rendre compte par ce fait qu'aux pôles de la planète on voit, pendant ses hivers, des masses blanches, qui sont évidemment des neiges. Le printemps les fait fondre, et elles se transforment en eau d'apparence sombre. Parfois ces masses de neiges polaires disparaissent entièrement pendant l'été, ce qui n'est jamais le cas de nos glaces polaires. Nous pouvons donc en conclure que la température moyenne est certainement au-dessus de zéro ; elle est très probablement d'environ 5 degrés. Il se peut donc aussi qu'il y ait de la vie organique à la surface de Mars. Il faut par contre être très optimiste pour conclure de l'existence des soi-disant canaux, à celle d'êtres intelligents. On a cru que ces canaux ne sont que le résultat d'illusions d'optique, mais les photographies de Lowell prouvent qu'ils existent bien réellement.

Les autres grandes planètes ont toutes une température superficielle très basse. Le calcul qui a conduit à ce résultat est cependant assez aléatoire, car ces globes n'ont probablement point de croûte superficielle solide ni même liquide. Ils sont plutôt entièrement gazeux, ce qui semble attesté par leur faible densité. Celle des planètes voisines du soleil est un peu plus faible que celle de notre terre. Mercure est le plus léger, sa densité n'étant que de 0,564, — la moitié de celle de la terre. Pour les planètes plus éloignées que nous, il y a tout de suite un grand saut de nous à Jupiter qui n'a que 0,23, puis Saturne 0,116 de notre densité. Les deux planètes extérieures de notre système sont un peu plus denses, — 0,4 environ —, mais les éléments de ces corps sont encore passablement indécis. Ces densités sont à peu près du même

ordre que celle du soleil, que nous savons être de 0,25. Or il est certain que celui-ci est entièrement gazeux, à l'exception de quelques nuages, d'importance relativement minime. Il est donc probable que les planètes extérieures, à partir de Jupiter, sont également gazeuses, et qu'elles sont enveloppées d'épais nuages qui empêchent nos regards de pénétrer dans leur intérieur. On ne peut donc guère supposer que des êtres animés puissent faire leur séjour de ces planètes.

La vie pourrait-elle plutôt exister dans leurs satellites ? À supposer que ceux-ci ne reçoivent aucune chaleur de leurs planètes, ils auraient les températures attribuées plus haut aux corps qui les retiennent autour d'eux. Considérons donc notre propre satellite. Vue de sa surface, la terre occupe un angle visuel environ 3,7 fois plus grand que le soleil. Si donc on admet que le soleil est à 6 200 degrés (ou 6 500 degrés absolus) on peut facilement calculer que la lune recevrait de la terre une quantité de chaleur égale à celle que le soleil nous envoie, si notre globe avait 3 100 degrés environ de température (ou 3 380 degrés absolus).

Les premiers nuages se sont formés dans l'atmosphère terrestre quand celle-ci est arrivée à 360° C environ. À ce moment le rayonnement de la terre sur la lune n'était que les 0,00125 de celle du soleil. Aujourd'hui ce rayonnement est encore vingt fois moindre. Il est facile de voir que ce rayonnement n'a absolument aucune importance dans l'économie calorifique de la surface lunaire.

Il en serait tout autrement si le diamètre de la terre était plus grand, semblable par exemple à celui de Jupiter qui l'est 11,6 fois plus, ou à celui de Saturne, dont le diamètre est 9,3 fois celui de notre globe. Dans ce cas le rayonnement de la surface terrestre

serait égal à un sixième ou à un neuvième du rayonnement actuel du soleil, en supposant que la surface de la terre fût à 360 degrés. La distance de notre lune à la terre étant de 384 000 kilomètres on en déduit sans peine que Jupiter et Saturne, — leur température superficielle étant supposée de 360°, — rayonneraient autant de chaleur vers des satellites distants de 240 000 kilomètres et de 191 000 kilomètres, que Mars en reçoit du soleil, par unité de surface.

Or, Jupiter et Saturne ont actuellement des lunes moins distantes de leur centre que les satellites hypothétiques dont il vient d'être question. Le premier en est à 126 000 kilomètres de distance, le second à 186 000 kilomètres. Il n'est donc nullement impossible que ces satellites reçoivent de leurs astres principaux des quantités de chaleur telles que la vie y soit possible, à supposer en outre qu'ils soient munis d'une bonne atmosphère protectrice. Il n'en serait peut-être pas de même pour leur éclairement. Jupiter, lorsqu'il est le plus éclairé, n'a qu'une puissance lumineuse égale à un sixième de celle du soleil ; Saturne un neuvième seulement. Cela ne représente, pour le satellite le plus rapproché, qu'un éclairement par sa planète égal à un vingt-septième ou un quatre-vingt dixième de ce que nous recevons du soleil. C'est une lumière bien faible pour le développement de la vie.

Il n'en reste pas moins que lorsque ces planètes étaient encore incandescentes, leurs satellites pouvaient fort bien être animés par la vie pendant un certain temps.

Fourier, le grand physicien français, admettait déjà (vers 1800) que notre atmosphère exerce un puissant effet protecteur contre la perte de chaleur par rayonnement. Ses idées furent plus tard développées par Pouillet et par Tyndall. Leur

théorie porte le nom de la théorie de la serre chaude, parce que ces physiciens admirent que notre atmosphère joue le même rôle que le vitrage d'une serre. Le verre possède en effet cette propriété, de laisser passer la chaleur que nous appelons lumineuse, c'est-à dire celle qui est perceptible à nos yeux. La chaleur obscure, au contraire, celle que nous envoie un poêle ou une masse terrestre chaude, n'est pas susceptible de le traverser. La chaleur solaire est en majeure partie lumineuse, et le verre lui est transparent ; elle peut entrer dans une serre et y échauffer le sol. Mais celui-ci à son tour n'émet que des rayons obscurs qui ne peuvent traverser le vitrage. Celui-ci protège donc l'intérieur de la serre à peu près comme un pardessus empêche la perte de chaleur, par rayonnement, de notre corps. On connaît l'expérience de Langley. Il prit une caisse, protégée contre le rayonnement par une enveloppe de coton, mais qui, du côté exposé au soleil, avait une face munie d'un vitrage double. Il constata à l'intérieur de la caisse, lorsque le soleil y donnait, une température de 113 degrés, tandis que placée à l'ombre, le thermomètre n'y marquait que 14 à 15 degrés. Cet essai fut fait sur la montagne de Pike's Peak, dans l'état du Colorado, qui a 4 200 mètres d'élévation. Il eut lieu le 9 septembre 1881 à 1 heure 40 minutes de l'après-midi, au moment où les rayons du soleil étaient d'une pénétration puissante.

Fourier et Pouillet admettaient donc que la ceinture atmosphérique que possède la terre a des propriétés qui se rapprochent de celles du verre, au point de vue de la perméabilité pour la chaleur. Cela fut reconnu exact par Tyndall. Les éléments de l'atmosphère qui sont causes de ce fait sont la vapeur d'eau et l'acide carbonique, qui l'un et l'autre n'existent qu'en faible partie dans l'air. L'ozone, les carbures d'hydrogène, produisent un effet analogue. Ces corps s'y trouvent cependant en si faible quantité

qu'on n'en a pas encore tenu compte dans le calcul. Mais on a, ces temps derniers, fait des expériences très minutieuses sur la perméabilité à la chaleur, de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau. À leur aide j'ai pu calculer que si l'acide carbonique disparaissait en entier de notre atmosphère, dont il n'occupe que les trois dix millièmes en volume, la température du sol diminuerait de 21 degrés.

L'effet de cet abaissement serait que la quantité de vapeur d'eau diminuerait à son tour. Il en résulterait un nouvel abaissement de la température presque aussi grand. On voit par cet exemple comment de très faibles changements dans la composition de l'air atmosphérique peuvent avoir des conséquences considérables. La disparition de la moitié de l'acide carbonique existant causerait un refroidissement d'environ 4 degrés ; la diminution jusqu'au quart de la proportion actuelle nous ferait perdre 8 degrés. L'acide carbonique doublerait-il en quantité, que nous gagnerions 4 degrés ; il devrait augmenter de quatre fois son volume actuel pour gagner 8 degrés. En même temps sa diminution accentuerait les différences de chaleur et de climat des différentes parties du globe ; son augmentation égaliserait au contraire la température.

On peut se demander si des variations caloriques de cette nature se sont produites sur la terre. Les géologues nous disent que oui. Nos temps historiques ont été précédés par une époque où la température devait être d'environ 2 degrés plus forte que maintenant. On peut le conclure d'après la zone d'habitat du noisetier, et aussi de la macre ou châtaigne d'eau (Trapa natans). On trouve des fruits fossiles de ces deux plantes dans des régions où, aujourd'hui, elles ne pourraient plus vivre, le climat étant devenu

moins favorable. Avant l'époque dont nous parlons, il y eut une période glaciaire, qui a chassé tous les habitants du nord de l'Europe de leur habitat. On a recueilli beaucoup d'indices qui semblent prouver que cette période glaciaire a été multiple, ses fractions ayant été entremêlées de périodes où les climats s'adoucirent et qu'on appelle interglaciaires.

On a cherché à évaluer la durée des périodes ainsi caractérisées par un développement des glaces. Des observations faites sur l'extension des glaciers dans les Alpes, ont fait voir que la température devait être de 5 degrés environ inférieure à celle d'aujourd'hui. La durée de cet état de choses a été estimée par les géologues à 100 000 ans au moins.

Antérieurement encore à cette époque, la surface du globe a dû passer par une période plus chaude d'environ 8 à 9 degrés au-dessus de la température moyenne actuelle. On peut le déduire de l'examen des plantes fossiles de l'époque dont nous parlons, qui est la période éocène. En même temps il devait régner sur la terre une uniformité de chaleur beaucoup plus grande.

Enfin les temps plus anciens encore semblent avoir présenté plusieurs variations du même genre.

Peut-on admettre que c'est à la suite de différences dans le contenu de l'atmosphère en acide carbonique, que ces changements de température se sont produits ? Högbom et après lui Stevenson ont répondu que oui. L'acide carbonique forme une fraction si peu importante de l'atmosphère que même la consommation industrielle du charbon semble pouvoir y influer. La consommation annuelle de houille a atteint en 1907 environ 1 200 millions de tonnes et elle augmente rapidement. Cette

quantité répand dans l'air environ 1/500 de sa teneur totale en acide carbonique. Bien que l'océan, en absorbant ce gaz, agisse comme un puissant régulateur, qui dissout environ les cinq sixièmes de celui produit, on peut concevoir que la très faible quantité répandue dans l'atmosphère puisse être modifiée, dans le cours des siècles, par la production industrielle. On comprend aussi qu'il n'existe pas une fixité bien absolue à cette teneur atmosphérique, et que vraisemblablement elle a été soumise à de notables variations dans le cours des âges.

La source principale qui fournit à l'air son acide carbonique, ce sont les volcans. Les cratères vomissent des quantités énormes de gaz qui proviennent de l'intérieur du globe, et qui sont constitués principalement par la vapeur d'eau et par l'acide carbonique. Ces gaz sont libérés par suite du lent refroidissement des silicates, existants à l'intérieur de notre terre. Les éruptions volcaniques ont eu une intensité très variable pendant les diverses phases de l'existence du globe. On peut admettre, avec une grande vraisemblance, qu'il y eut des périodes de très grande activité volcanique, pendant lesquelles l'abondance d'acide carbonique était beaucoup plus grande dans l'air. D'autres périodes plus calmes en ont répandu moins. M. Frech, professeur de géologie à Breslau, a essayé de prouver que ces faits trouvaient leur confirmation dans les découvertes de la géologie, en ce que des époques connues pour le développement du volcanisme avaient un climat généralement chaud, et que les époques de moins grande activité des volcans étaient froides. La période glaciaire, notamment, correspond à la disparition presque complète de l'activité volcanique. Par contre, les deux périodes du commencement et du milieu de l'époque tertiaire (éocène et miocène), qui sont reconnues comme ayant eu un climat à température très éle-

vée, sont caractérisées comme des périodes de très grande activité volcanique. Ces mêmes concordances peuvent être constatées encore pour des âges géologiques beaucoup plus anciens.

On pourrait s'étonner de ce que la teneur de l'atmosphère en acide carbonique n'augmente pas d'une façon continue, étant donné que les volcans en jettent sans cesse des volumes énormes dans l'air. C'est qu'il existe une cause qui en absorbe de même des quantités considérables, savoir la décomposition des minéraux de la croûte terrestre.

Les espèces minérales qui arrivèrent à la surface du globe après le premier durcissement des masses fondues, de ce qu'on a appelé le magma, étaient des combinaisons de silice avec l'alumine, la chaux, la magnésie, avec un peu de fer et de soude. Ces minéraux ont peu à peu subi l'attaque de l'acide carbonique de l'air et de l'eau contenant ce même acide en dissolution. La chaux, la magnésie et les sels alcalins, puis, à un moindre degré, le fer, ont formé des carbonates solubles qui ont été entraînés par les fleuves dans l'océan. Là, les êtres vivants, animaux ou algues, se sont emparés de ces combinaisons de chaux et de magnésie. Ils les ont assimilées et les ont laissées dans leurs résidus, en sorte que l'acide carbonique s'est déposé sans cesse dans les couches sédimentaires. Högbom a calculé que les calcaires et les dolomies du globe contiennent environ 25 000 fois plus d'acide carbonique que n'en contient l'atmosphère. Chamberlin arrive à un résultat analogue, — de 20 à 30 000 fois, — mais dans son calcul il néglige les couches précambriennes. Ces estimations sont probablement encore bien trop faibles.

Tout l'acide carbonique qui se trouve aujourd'hui accumulé dans les couches sédimentaires a passé par l'état gazeux dans

l'atmosphère. Un processus différent, par lequel il est absorbé, est l'assimilation qu'en font les plantes terrestres. Elles forment à son aide, en l'absorbant, des combinaisons de carbone, et rendent à la circulation de l'oxygène.

Tout comme l'attaque des minéraux, l'assimilation par les plantes est intensifiée par l'augmentation du pourcentage atmosphérique en acide carbonique. E. Godlewski, le botaniste polonais, a démontré déjà en 1872 que certaines plantes absorbent par unité de temps une quantité de ce gaz qui est tout d'abord proportionnel à la teneur atmosphérique. Telles sont les Typha latifolia (ou massette) et la Glyceria spectabilis, autre plante des marais. Quand l'air dans lequel elles vivent arrive à contenir 6 p. 100 d'acide carbonique pour la première, 9 p. 100 pour la seconde, elles en assimilent un maximum. Dans une atmosphère plus chargée leur pouvoir assimilant régresse. Mais jusque-là, leur pouvoir absorbant est proportionnel à la teneur. Si, en même temps, la température s'élève, par exemple de 4 degrés, la vitalité de la plante augmentera de 1 à 1,5 p. 100, de sorte qu'un doublement de l'acide carbonique de l'air, joint à une augmentation de température, entraînerait par suite de la combinaison des deux causes distinctes, une majoration dans l'absorption, dans la proportion de 1 à 3.

Il en est à peu près de même pour l'attaque des substances minérales par l'acide carbonique. Son doublement triplera à peu près l'intensité des échanges aussi bien dans le monde végétal que dans le monde inorganique.

Considérons la production de la matière végétale par le sol qui la nourrit. Liebig s'est occupé de l'estimation de cette production par les champs, par les prairies et par la forêt. Il est arrivé à cette

conclusion, qu'en moyenne, un hectare de surfaces de ce genre produit annuellement 2 500 kilogrammes de matière organique sèche. Ce chiffre s'applique à l'Europe centrale, de climat moyen. En beaucoup de points du globe la production est bien plus forte, sous les tropiques par exemple. Ailleurs elle est moins grande, dans les déserts comme dans les régions arctiques. On peut, sans erreur grossière, prendre le chiffre de Liebig comme une moyenne pour la surface de la terre, déduction faite des océans.

Dans les matières végétales ainsi produites, qui consistent principalement en cellulose, le carbone représente environ 40 p. 100 de leur poids. On en déduit facilement que la production annuelle de carbone par la végétation, à la surface de notre globe, est d'environ 13 000 millions de tonnes. Cela représente près de dix fois la consommation annuelle de houille que nous faisons. C'est un cinquantième de la quantité totale de l'acide carbonique de l'atmosphère. Si donc toutes les plantes existantes étaient déposées dans des tourbières, l'air serait bientôt privé de tout son acide carbonique. Mais une fraction seulement de tout ce produit de la végétation est mis en réserve pour l'avenir. La majeure partie, et de beaucoup, retourne dans l'atmosphère par suite de combustion, de décomposition, de pourriture, etc.

Chamberlin raconte qu'il s'était posé, de concert avec cinq autres géologues américains, le problème de déterminer combien il faudrait de temps pour absorber, par la décomposition des roches, l'acide carbonique de l'atmosphère. Des procédés divers les conduisirent à des chiffres qui variaient de 5 000 à 18 000 années, avec une moyenne assez probable de 10 000 années. On peut admettre que la formation des tourbières demande une durée à peu près égale à celle prise par la décomposition des miné-

raux. L'ensemble des deux causes n'absorberait donc que le dixième environ de l'acide carbonique fourni par la combustion du charbon fossile à l'atmosphère dès aujourd'hui.

Or les deux causes d'absorption que nous venons d'indiquer sont les plus importantes qui, actuellement, produisent encore leurs effets. Il semble donc que la teneur en acide carbonique de l'air doive augmenter constamment et d'une façon assez sensible, par la consommation industrielle toujours croissante de la houille, du pétrole, etc., telle que la statistique nous l'indique. Cette progression augmentera encore avec l'emploi toujours croissant des combustibles minéraux.

La quantité totale d'acide carbonique qui se trouve emmagasinée dans les calcaires et les dolomies sédimentaires, est environ vingt cinq mille fois celle qui actuellement existe dans l'atmosphère. Elle a passé tout entière par l'air à l'état gazeux. Comme il faut environ 10 000 années pour que la désagrégation des roches absorbe une quantité équivalente à celle qui existe, si l'on suppose que cette désagrégation s'est toujours faite avec une égale intensité, on arrive à attribuer une durée de 250 millions d'années au dépôt des sédiments qui contiennent de l'acide carbonique. Comme on le voit, cette estimation concorde très bien avec celle faite plus haut sur d'autres bases.

Ce qui précède nous permet de nous rendre compte dans une certaine mesure, de l'énorme développement qu'avait pris, à certaines époques géologiques, la végétation du globe, notamment pendant l'ère carbonifère.

Cette ère nous est connue par la masse énorme de restes végétaux qui se sont trouvés enfouis dans les marais argileux, pour s'y

carboniser lentement, et qui maintenant, par le fait de leur exploitation, restituent à sa condition primitive, par la combustion, l'acide carbonique qui les a formés. Une proportion notable de ce corps, contenu dans l'atmosphère, avait disparu et s'était déposé dans le sein de la terre à l'état de charbon, de lignite, de tourbe, de pétrole ou d'asphalte. L'oxygène qui en faisait partie intégrante avait été libéré et restait à l'état gazeux. On a pu faire l'estimation de cet oxygène encore contenu dans l'air. On l'a évalué à 1 216 billions de tonnes. Et on a reconnu que cette quantité correspond approximativement à la quantité de carbone qui se trouve fixé, solidifié, dans les couches sédimentaires.

De là à conclure que tout l'oxygène de l'air a été produit aux dépens de l'acide carbonique de l'atmosphère il n'y a qu'un pas. Cette idée a été énoncée pour la première fois en 1856, par Koene, de Bruxelles. Elle a été l'objet de vives discussions et elle a gagné en vraisemblance. Il est vrai qu'une certaine quantité d'oxygène a certainement dû disparaître dans la décomposition des minéraux, par exemple dans l'oxydation des pyrites et des sels de protoxyde de fer. Sans cela la teneur en oxygène de l'air serait plus grande encore. Mais d'un autre côté il existe dans les dépôts sédimentaires un nombre considérable de corps désoxydés. Les pyrites même se sont parfois reconstituées, par exemple, par l'intermédiaire du carbone, sous forme de matières organiques. Un nombre considérable de corps se sont décomposés primitivement sous l'influence d'un procédé oxydant, qui devait son oxygène à une décomposition végétale de l'acide carbonique. Ils n'ont donc fait que retourner, par l'oxydation, à leur forme primitive. Il nous suffit de pouvoir constater que l'oxygène de l'air correspond environ à la quantité de carbone déposée dans

les couches sédimentaires. Il y a par conséquent probabilité que tout l'oxygène libre est dû à la vie végétative.

Une autre raison encore nous conduit à la même conclusion. Nous savons de source certaine, qu'il existe, dans l'atmosphère solaire, de l'oxygène libre, mais que toutefois l'hydrogène s'y trouve en quantités prépondérantes. M. Slipher, astronome de l'observatoire de Lowell, dans l'état d'Arizona, a constaté l'existence de grandes quantités d'hydrogène dans les atmosphères des planètes les plus éloignées du soleil, Neptune et Uranus. À l'origine des choses, l'atmosphère terrestre était sans doute de composition analogue, et par suite du refroidissement graduel, ces deux gaz se sont combinés pour former de l'eau, une certaine quantité d'hydrogène restant en excès. Il est possible que la première atmosphère terrestre ait contenu aussi des carbures d'hydrogène, car ces gaz existent dans les masses gazeuses des comètes. L'intérieur du globe expulsait, et joignait aux gaz sus-indiqués de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau. L'azote, en vertu de sa grande inertie chimique, s'est vraisemblablement maintenu à peu près tel quel. Or, un chimiste anglais, Phipson a cru démontrer que des plantes d'organisation supérieure aussi bien qu'intérieure (la gesse des champs et certaines bactéries) peuvent vivre et se développer dans une atmosphère privée de tout oxygène mais contenant de l'acide carbonique et de l'hydrogène. Il serait donc possible qu'il y eut déjà sur la terre, certains organismes végétaux, avant que l'air ne contint de l'oxygène. Ces plantes ont dû extraire ce gaz des produits carboniques provenant des volcans. À son tour cet oxygène a dû transformer, peut-être sous l'influence de décharges électriques, l'hydrogène et ses carbures en eau et en acide carbonique. Cette transformation a

pu se continuer ainsi jusqu'à ce que l'oxygène subsistât presque seul, à peu près conformément à la composition actuelle de l'air.

Cet oxygène est d'une nécessité absolue pour l'existence de la vie animale. Nous considérons les animaux comme plus élevés que les plantes dans l'échelle des êtres vivants : ils ont de même apparu sur la terre à une époque plus récente. Les végétaux n'ont besoin pour vivre que d'une température appropriée, d'acide carbonique et d'eau. Ces gaz existent vraisemblablement dans l'atmosphère de toutes les planètes, attendu qu'ils sont les produits de dissociation de leurs masses incandescentes, soumises à un lent refroidissement. Le spectroscope a prouvé qu'il existe effectivement encore de l'hydrogène dans l'atmosphère d'autres planètes que la nôtre : Vénus, Jupiter et Saturne. Cela est démontré indirectement aussi pour Mars. M. Slipher a fait, en 1908, des mesures de l'intensité de certaines bandes d'absorption qui sont caractéristiques de la vapeur d'eau, et qui existent dans la lumière réfléchie par la planète Mars. La lumière réfléchie par la Lune servait d'élément de comparaison. J'ai soumis au calcul le résultat de ces mesures, et j'ai trouvé que l'air de Mars, dans le voisinage de son équateur, doit contenir environ 2,14 gr. d'eau en vapeur, par mètre cube. Les régions équatoriales de cette planète ont sans doute, à un très haut degré, un climat continental, analogue approximativement à celui de Salt-Lake City (Utah), en été, où l'humidité relative n'est que de 33 p. 100. Au point auquel se rapporte l'observation faite sur Mars, la température serait d'environ 5° C. On l'avait précédemment évaluée à 10 degrés à l'équateur et zéro degré aux pôles, en été, à cause de la disparition, observée parfois, des glaces polaires, ainsi qu'il a été indiqué déjà plus haut.

La spectroscopie a fourni encore des indices de l'existence d'autres gaz, par exemple pour Jupiter et Saturne. On remarque en effet une raie intense dans la partie rouge du spectre de ces planètes (de 0,000618 mm. de longueur d'onde). D'autres composés, de nature encore inconnue, ainsi que beaucoup d'hydrogène, selon Slipher, ont été trouvés dans les spectres d'Uranus et de Neptune. Par contre la Lune et Mercure n'ont aucune atmosphère, ou tout au plus y en a-t-il une absolument insignifiante.

Ces faits sont aisés à expliquer. À la surface de Mercure, le côté opposé au soleil est à une température très voisine du zéro absolu. Tous les gaz de l'atmosphère de ce corps doivent s'y réunir et s'y condenser. Si donc Mercure a eu primitivement une véritable atmosphère il doit l'avoir perdue lorsqu'il a cessé d'avoir une rotation propre, pour tourner perpétuellement vers le soleil une même face. Des arguments analogues peuvent s'appliquera notre satellite, pour rendre compte de l'absence d'atmosphère.

Si, comme le soutiennent un grand nombre d'astronomes, Vénus tournait toujours, comme Mercure, un même hémisphère vers le soleil, elle ne pourrait avoir aucune atmosphère, ni aucun nuage flottant. Or nous savons que cette planète a au contraire une atmosphère très importante. Ce fait constitue l'argument le plus puissant contre l'hypothèse que Vénus se comporte comme Mercure au point de vue de la rotation autour de son axe.

Les époques chaudes et les époques glaciaires ont alterné sur notre globe depuis que l'homme y a fait son apparition.

La question s'impose donc : est-il probable que dans les prochaines époques géologiques, nous soyons menacés d'une nou-

velle période glaciaire ? Il ne semble pas que cela soit à craindre. La consommation du charbon pour des besoins industriels est de nature à augmenter sensiblement la teneur de l'air en acide carbonique. En outre, il semble que le volcanisme, dont les méfaits ont été particulièrement violents dans les temps récents, — on se souvient des éruptions de Krakatoa en 1885 et de la Montagne Pelée en 1902, — soit encore en progrès. Il semble donc probable que l'acide carbonique augmente plutôt, et même assez rapidement, dans l'air. Nous en avons un indice dans ce fait que l'océan semble absorber de l'acide carbonique de l'air, car dans son voisinage la teneur de l'air de ce gaz est d'environ 10 p. 100 plus faible qu'à l'intérieur des continents.

Si en effet la proportion d'acide carbonique de l'air était depuis longtemps constante, l'eau qui en tient en dissolution devrait avoir mis en équilibre celui qui est dissous avec celui qui est libre. Si, au contraire, la mer continue à absorber l'acide carbonique de l'air, cela indique que l'équilibre s'est trouvé précédemment établi avec une atmosphère qui en contenait moins qu'aujourd'hui. Il faudrait donc en conclure que la proportion de ce gaz est en voie d'augmentation dans l'océan atmosphérique.

On entend souvent exprimer des craintes parce que les

Fig. 17. — Photographie de la surface lunaire. Environs du cratère Copernic.
Cliché de l'observatoire Yerkes, Wisconsin. E.-U.
L'échelle correspond à une dimension de 0,55 m. du diamètre de la Lune. Par suite de l'absence d'une atmosphère et de toute précipitation d'eau, les falaises du cratère et les autres aspérités de la surface restent sans altération. réserves de houille existant sur notre globe sont attaquées et consommées par la civilisation ac-

tuelle, sans qu'on ait aucune prévoyance ni égards pour l'avenir. On s'effraie en même temps des énormes pertes de vies et de biens qui sont la conséquence des phénomènes volcaniques de nos jours. Peut-être trouvera-t-on qu'il convient de se rasséréner en se rappelant qu'il n'y a ici, comme souvent, qu'un dommage d'un côté pour un bien de l'autre. Par suite de l'augmentation de l'acide carbonique dans l'air, il nous est permis d'espérer des périodes qui offriront au genre humain des températures plus égales et des conditions climatériques plus douces. Cela se réalisera sans doute dans les régions les plus froides de notre terre. Ces périodes permettront au sol de produire des récoltes considérablement plus fortes qu'aujourd'hui, pour le bien d'une population qui semble en voie d'accroissement plus rapidement que jamais.

Une partie du charbon brûlé dans nos fourneaux passe dans l'atmosphère, avec les gaz produits par la combustion, mais sous forme de suie. On croyait autrefois que cette fine poussière de carbone était des lors perdue pour l'économie vitale de la nature, car le carbone est extrêmement résistant à tous les agents chimiques, tant que la température reste basse. On a cependant reconnu, dans les temps récents, que certaines bactéries connues sous le nom de diplocoques, attaquent ces fines poussières charbonneuses. Elles les transforment en acide carbonique, qui se répand dans l'atmosphère, ou qui devient un agent de désagrégation.

C'est à Johnstone Stoney que nous devons l'hypothèse que les corps célestes perdent peu à peu leur enveloppe atmosphérique. Ces gaz s'en vont d'autant plus rapidement que leurs molécules sont plus légères, et que la masse du corps lui-même est plus

faible. Cela expliquerait pourquoi les petits globes, tels que la lune et Mercure, ont perdu à peu près totalement leur atmosphère. La terre, par contre, n'a perdu que l'hydrogène et l'hélium, qui subsistent encore dans le soleil.

03

Dans les temps anciens, et encore au siècle dernier, on discutait volontiers la question de savoir dans quelle mesure les rapports de la terre et du soleil étaient destinés à rester permanents.

D'une part, l'on pouvait concevoir que la distance de l'un à l'autre diminuât ou s'agrandît. D'autre part, il ne semblait point impossible que la durée de la rotation terrestre changeât et devînt peut-être tout à fait nulle. Il suffirait que l'une de ces éventualités se produisît, même dans une mesure partielle et restreinte, pour que l'existence de la vie sur notre globe fût menacée. Le problème de la permanence du système solaire fut examiné par les astronomes ; ceux qui le posèrent offrirent de hautes récompenses pour une solution favorable.

Si notre système ne comprenait que le soleil et la terre seuls, la durée en serait assurée pour des temps indéfinis. Mais les autres planètes ont aussi une influence, bien petite, il est vrai, sur le mouvement de la nôtre. Si cette influence est aussi restreinte, cela provient de ce que la masse totale des corps planétaires n'est que d'environ 1/750 de la masse du soleil, et encore de ce que tous ces corps circulent autour de l'astre central dans des orbites qui sont très près d'être circulaires, enfin qu'ils ne peuvent conséquemment jamais beaucoup approcher l'un de l'autre. Les calculs

des astronomes font voir que les perturbations de leur marche sont exclusivement périodiques et qu'elles ont des périodes variant de 50 000 à 2 000 000 d'années, en sorte que tout leur effet se réduit à une oscillation très faible autour d'une position ou d'une orbite moyennes.

Àcet égard donc, tout va bien. Mais il existe d'autres corps célestes, dont les trajectoires sont en majeure partie inconnues, sans être du tout circulaires par rapport à notre soleil, à savoir, les comètes. Les craintes que l'on concevait à l'égard d'une rencontre avec un corps céleste de ce genre ont encore préoccupé très vivement les savants du siècle dernier. Les faits ont prouvé que la rencontre de la terre et d'une comète n'a pas de suites bien sérieuses. Plusieurs fois, en effet, en 1819 et en 1861 par exemple, la terre a traversé des queues de comètes connues, sans qu'on l'ait su autrement que par les calculs des astronomes. Une fois, l'on a cru observer, à cette occasion, une lueur du genre d'une aurore boréale. La terre s'approchait-elle des parties plus denses de la queue cométaire, on observait une pluie un peu abondante d'étoiles filantes, qui ne causèrent aucun dommage sensible dans leur chute. La masse qui constitue les comètes est en effet très faible et elle ne saurait aucunement influer d'une façon perceptible sur le cours des planètes.

La rotation de la terre autour de son axe devrait diminuer graduellement par suite de l'action des marées, attendu que celles-ci exercent une action de freinage sur la surface du globe. Ce freinage est toutefois si peu important qu'il a été impossible aux astronomes d'en constater les effets, au moins depuis les temps historiques. La lente contraction du globe terrestre agit quelque peu en sens inverse. Laplace a cru pouvoir conclure des observations

de certaines éclipses du soleil, relatées dans les temps anciens, que depuis l'an 729 avant notre ère, la durée du jour n'a pas varié d'un centième de seconde.

Nous savons encore que notre soleil, accompagné de son cortège de planètes, s'avance dans les espaces célestes dans la direction de la constellation de la Lyre. La vitesse de cette translation est d'environ 20 kilomètres par seconde, vitesse vertigineuse pour nos conceptions humaines. Ne se pourrait-il pas que dans cette course à travers les espaces stellaires, les corps de notre système rencontrassent d'autres corps célestes inconnus ? Cela est infiniment peu probable, et des billions d'années s'écouleront avant qu'une semblable catastrophe se produise, tant les corps célestes sont rares. Nous pouvons être entièrement rassurés à ce sujet.

Sous le rapport du mouvement, tout semble donc en bon ordre en ce qui concerne notre planète. Mais depuis que la théorie moderne de la chaleur a poursuivi ses triomphes parmi les sciences naturelles, la situation a quelque peu changé. On est arrivé à se rendre compte que toute vie et tout mouvement terrestres sont entièrement dépendants du rayonnement solaire. Le seul mouvement des vagues des marées y fait exception, dans une mesure fort peu importante. Il faut donc en arriver à se demander si la réserve d'énergie du soleil ne s'épuisera pas quelque jour. Cette énergie ne se dirige pas seulement vers les planètes, mais sa majeure partie, de beaucoup, se répand et se perd dans les espaces inconnus de l'univers glacé. Avec sa disparition finiraient vile toutes les joies comme toutes les peines de la vie terrestre. Cette situation peut sembler d'autant plus grave, que sur 2 300 millions d'unités rayonnées, répandues par le soleil, une

seule unité est recueillie par la terre, dix unités seulement par l'ensemble des planètes de notre système, y compris leurs satellites. Or le rayonnement du soleil est tellement énergique, que chaque gramme qui entre dans la constitution de la masse solaire, perd annuellement deux calories. Si donc le soleil avait une capacité spécifique égale à celle de l'eau, — capacité notablement supérieure à celle de la plupart des corps —, il perdrait chaque année deux degrés de sa température.

Or on a calculé que la température des parties extérieures ou superficielles du soleil est de 6 000 à 7 000 degrés. Il s'ensuivrait que, même depuis les temps historiques, le soleil devrait être entièrement refroidi ! Lors même que l'intérieur du soleil serait, ainsi qu'il est probable, à une température beaucoup plus élevée que celle de ses parties extérieures, il faudrait encore s'attendre à ce que cette température et son rayonnement eussent sensiblement diminué depuis que l'homme a une histoire. Cependant tous les documents qui nous viennent de l'ancienne Babylonie et de l'Égypte semblent indiquer que le climat de ces pays était, au début des temps historiques, extrêmement voisin de celui d'aujourd'hui. Il semble que le soleil ait éclairé et réchauffé nos ancêtres les plus reculés exactement de la même façon qu'il chauffe et éclaire aujourd'hui leurs lointains descendants.

Ces faits conduisent en général à croire que notre soleil, dans son compte débiteur et créditeur, ne se trouve pas seulement avoir un côté dépenses, mais également un côté recettes sensiblement équivalent. Le docteur allemand Mayer, à qui revient le mérite immortel d'avoir le premier énoncé une loi de causalité sur les rapports entre la chaleur et le travail mécanique, a dirigé dès l'origine son attention sur l'économie de l'état calorifique du so-

leil. Il admettait que des nuées de corps météoriques, se précipitant dans la masse du soleil avec la vitesse vertigineuse de 600 kilomètres par seconde, y perdaient ce mouvement et que cette réduction à l'immobilité engendrait de la chaleur. Elle produirait environ 45 millions de calories par gramme de météore. Par la suite cependant, le tour des planètes serait venu. Elles seraient successivement sacrifiées de la même façon, entretenant par leur chute, pendant un peu de temps, les dernières lueurs de cette vie très particulière du soleil. Comme le veut la légende antique pour Saturne, le soleil se trouverait condamné à dévorer ses propres enfants, pour prolonger son existence. Mais il devient clair combien peu ce sacrifice serait utile, quand on fait le compte, et que l'on remarque que la chute de la terre sur le soleil ne saurait donner à celui-ci une quantité de chaleur qui compense son rayonnement pendant une durée même de cent ans. D'autre part encore, la chute de ces météores que l'on supposait arrivant vers le soleil à peu près également de toutes les directions de l'espace, aurait depuis longtemps mis fin à la rotation du soleil autour de son axe. Autre conséquence : par suite de l'augmentation toujours croissante de la masse du soleil et de sa puissance d'attraction également croissante, la durée de chacune de nos années aurait dû diminuer d'environ 2,8 secondes. Cela est complètement contraire à ce que constate le savoir et l'expérience des astronomes. Enfin il faut bien admettre encore que l'hypothèse de Mayer ne va pas sans supposer qu'une quantité proportionnelle de ces mêmes météores doit venir s'échouer à la surface de notre globe. La surface de celui-ci se trouverait ainsi entretenue à une température de 800 degrés, d'accord avec les données mentionnées au chapitre iv. Cela seul suffit à prouver combien cette hypothèse est erronée.

Il faut donc une autre explication. Helmholtz, un autre des plus éminents promoteurs de la théorie mécanique de la chaleur, émit l'idée que ce ne seraient pas les météorites étrangers qui tomberaient ainsi vers le centre du soleil, mais que ce seraient les parties constituantes de cet astre lui-même qui accompliraient cette chute. En d'autres mots, le soleil se condenserait. En raison de la puissance énorme de la gravitation, qui y est 27,4 fois plus grande qu'à la surface de la terre, il s'ensuivrait une libération considérable de chaleur. Helmholtz fit ce calcul, que pour produire une quantité de chaleur équivalente à celle que le soleil perd annuellement par rayonnement, il faudrait que le diamètre de l'astre diminuât, dans le même temps, de 60 mètres. Si le diamètre solaire diminuait de 1/10000 de sa grandeur, — ce qu'il nous serait absolument impossible de reconnaître, — la perte de chaleur rayonnante serait couverte pour une durée de plus de 2 000 ans. C'est un résultat qui satisfait passablement l'esprit. Mais si l'on va plus loin, on trouve autre chose. Si, pendant une durée de 17 millions d'années, le soleil continue à perdre la même chaleur qu'aujourd'hui, il se sera réduit à environ un quart de son volume actuel. Il aurait alors approximativement la même densité que possède aujourd'hui la terre. Longtemps avant ce moment, le rayonnement aurait diminué de telle façon que la température de notre globe ne dépasserait pas zéro. C'est pourquoi Helmholtz fixait la durée d'avenir de la vie sur notre globe à environ 6 millions d'années. Cela est peu satisfaisant. Seulement à quoi bon nous préoccuper d'un avenir si lointain qu'il nous oblige de nous contenter d'hypothèses ?

Il en est autrement, cependant, si, sur la base de la théorie formulée par Helmholtz, nous remontons dans le passé. D'après celle-ci, et en se servant des données mêmes de l'illustre savant,

un état comme celui où nous nous trouvons, ne peut pas avoir duré plus de 10 millions d'années environ. Or, les géologues sont arrivés à cette conclusion que les couches fossilifères de notre globe ont mis à se former au moins 100 millions d'années et il semble probable que c'est plutôt 1 000 millions d'années qu'il faudrait leur supposer. Les formations précambriennes, plus anciennes encore, ont exigé sans doute pour leur dépôt une durée tout aussi longue, ou plus longue encore. Il saute donc ainsi aux yeux combien cette hypothèse finit par être peu satisfaisante.

Quelques savants ont cherché une autre issue à ce dilemme, et ils croient l'avoir trouvée dans un singulier ordre d'idées. Nous savons depuis peu qu'un gramme de cette étonnante matière, le radium, émet en une heure environ 120 calories, ou, en chiffres ronds, 1 million de calories par an. Il semble que pendant des années cette radiation continue sans changement aucun. Or, si l'on admet que chaque kilogramme de la masse solaire ne renferme que 2 milligrammes de radium, cela suffit pour rendre compte du rayonnement calorifique du soleil pour des éternités ! Nous ne pouvons cependant pas accepter une déduction semblable sans être contraints à une autre hypothèse secondaire. Il faut admettre en effet que la chaleur se crée de rien ! D'aucuns croient cependant que le radium doit, sans que nous sachions comment, recevoir de l'espace une radiation quelconque, qu'il l'absorbe et qu'il la transforme en chaleur. Avant qu'on puisse se résoudre à la discussion scientifique d'une semblable explication, il faudrait nous dire quelle est l'origine de cette radiation et où se trouve sa réserve, sa provision d'énergie.

Il faut donc nécessairement nous mettre à la recherche de quelqu'autre source qui fournisse l'énergie nécessaire pour ali-

menter l'émission de chaleur du soleil. Mais avant de découvrir celle-ci, il faut que nous étudiions la constitution du soleil lui-même.

Tout le monde est d'accord sur ce point, que le soleil est constitué de la même manière que les milliers d'étoiles brillantes que nous voyons au firmament céleste. Suivant la qualité de la lumière que celles-ci nous envoient, on les classe en étoiles blanches, jaunes ou rouges. La différence entre leurs lumières s'accentue quand on les observe au spectroscope. Les étoiles blanches contiennent d'une façon prépondérante, de l'hélium ou de l'hydrogène. (Les étoiles à hélium accusent en outre la présence de l'oxygène.) Les métaux sont relativement rares, tandis qu'ils jouent un plus grand rôle dans les étoiles de couleur jaune. Dans celles-ci on trouve aussi un certain nombre de bandes spectrales. Dans les spectres des étoiles rouges par contre, les bandes spectrales abondent, indice que dans les couches extérieures de ces étoiles il existe de nombreuses combinaisons chimiques.

Chacun sait que le fil de charbon ou de platine d'une ampoule d'éclairage, chauffé par le passage d'un courant électrique, devient d'abord rouge, tant que le courant est faible, puis jaunâtre à mesure que le courant augmente, et enfin blanchit de plus en plus sous l'intensité grandissante de celui-ci. La température augmente de même. À l'aide de la teinte de cette coloration, on peut déterminer la température du corps échauffé. Si l'on connaît la longueur d'onde de la lumière qui, dans le spectre normal d'une étoile produit le plus grand effet calorifique, il est facile de calculer la température de cette étoile, à l'aide d'une loi établie par Wien. Il suffit de faire le quotient de 2,89 par ladite longueur d'onde, mesurée en millimètres, pour obtenir la valeur de la tem-

pérature absolue du corps lumineux. Si de ce chiffre on retranche 273 on a la température exprimée en degrés du thermomètre centigrade qui nous est usuel.

Le soleil nous donne un maximum d'action calorifique par des ondes de 0,00055 mm. (soit 55 100 000 de millimètres) de longueur. Ce sont celles de la région vert-jaunâtre du spectre. Partant de là, le calcul donne pour température correspondante de la couche solaire rayonnante, la photosphère, 5 255 degrés absolus, correspondants à peu de chose près à 5 000 °C. Il faut cependant remarquer que l'atmosphère qui entoure notre globe a une certaine puissance d'absorption pour les rayons solaires, et encore, qu'elle opère un petit déplacement de la position, dans le spectre, du maximum des rayons calorifiques. Cela est également le cas pour l'atmosphère solaire, de sorte que l'on peut conclure que la température du soleil est supérieure à 5 000 degrés. La même recherche de cette température a été faite à l'aide de la loi de Stefan, et on a trouvé environ 6 200 degrés, ce qui correspond à une longueur d'onde de 0,00045 mm. La correction est, comme on le voit, assez importante. La moitié de la différence, environ, est due à l'action de l'atmosphère solaire ; l'autre moitié provient des causes terrestres. Un astronome hongrois, Harkânyi, a calculé par ces mêmes procédés les températures de plusieurs étoiles blanches (Véga et Sirius) et il a trouvé une température supérieure de 1 000 degrés environ à celle du soleil. Par contre l'étoile rouge Bételgeuse, la plus brillante de la constellation d'Orion, n'aurait qu'une température inférieure à celle du soleil, d'environ 2 500 degrés.

Il convient de remarquer au sujet de cette mesure des températures qu'elle s'applique exclusivement à des étoiles qui émet-

traient des rayons identiques à ceux du corps rayonnant ayant servi de point de comparaison. Toutefois la lumière stellaire subit de forts changements avant qu'elle n'arrive à la surface de notre globe. Ainsi on a pu observer sur des étoiles nouvelles qu'elles sont parfois enveloppées d'un nuage de poussière cosmique, qui filtre les rayons lumineux, absorbant les rayons bleus, et laissant passer les rayons rouges. L'étoile apparaîtra donc avec une lumière moins franchement blanche que si ce nuage n'existait pas, et l'évaluation de la température sera par conséquent moins élevée qu'elle n'est en réalité.

On a observé, pour les étoiles rouges, la production de bandes spectrales qui indiquent l'existence de combinaisons chimiques. Parmi elles les plus intéressantes sont les combinaisons du cyanogène et du carbone avec — probablement — l'hydrogène. Elles rappellent celles qui apparaissent dans les spectres des flammes du gaz, qui ont été observées par Swan, et qui sont nommées d'après lui. On croyait autrefois que la présence de ces bandes indiquait l'existence de températures peu élevées, mais, comme nous l'expliquerons plus loin, cela n'est nullement certain. M. Hale a remarqué, en observant des éclipses solaires, que l'on trouve exactement les mêmes combinaisons à la surface supérieure des nuages lumineux du soleil, et il est probable qu'elles se trouvent en plus grande abondance encore, un peu au-dessous de ces nuages, où la température est sans nul doute plus élevée qu'au-dessus.

Quoi qu'il en soit, nous avons des raisons de croire que le soleil, qui est aujourd'hui une étoile jaune, fut jadis une étoile blanche, comme le splendide Sirius, et qu'il s'est graduellement refroidi jusqu'à son apparence actuelle ; qu'enfin il viendra un

jour où il émettra une lumière rouge, comme Bételgeuse. Il ne répandra alors plus qu'un septième environ de la chaleur qu'il envoie maintenant dans l'espace : il est probable que longtemps avant que ce moment n'arrive, la terre ne sera plus qu'un désert glacé.

Comme nous l'avons dit plus haut, les atmosphères du soleil et de la terre exercent une forte absorption sur les rayons solaires, particulièrement sur les rayons bleus et violets. De là vient que la lumière du soleil nous paraît plus rouge le soir qu'à midi, parce qu'elle est obligée de traverser, pour venir jusqu'à nos yeux, une couche atmosphérique très épaisse, qui absorbe les rayons bleus. C'est par la même raison que l'exploration spectroscopique du soleil accuse une couleur beaucoup plus rouge sur les bords qu'au centre. Cet affaiblissement de la lumière a pour cause l'existence de fines poussières dans l'atmosphère de chacun des deux astres, terre et soleil. On a vu, lorsque des éruptions volcaniques ont rempli l'air de notre globe de poussières éruptives, combien fortement le soleil est coloré en rouge quand il s'approche de l'horizon, produisant ce qu'on a désigné sous le nom de « reflet rouge ». Tel fut le cas lors des puissantes éruptions de Krakatoa (1883) et de la Montagne Pelée (1902).

Examinons une image solaire, qui, à l'aide d'une lentille, a été projetée sur un écran blanc. Nous y remarquerons souvent un amas de taches très caractéristiques. Ces taches ont déjà attiré l'attention du Galilée et furent découvertes à peu près simultanément par lui, par Fabricius et par Scheiner (1610–1611). Depuis lors ce sont elles qui peut-être ont donné lieu au plus grand nombre d'observations à la surface du soleil. Leur nombre et leur dimension sont soigneusement notés et l'on combine ces deux

ordres de grandeur pour définir la « fréquence des taches solaires ». Les chiffres qui expriment cette fréquence varient d'année en année, mais assez irrégulièrement. Ils ont cependant une récurrence périodique de 11,1 années, en moyenne. Ces taches apparaissent suivant deux zones, à la surface du soleil, et traversent son disque en 13 à 14 jours. On admet en conséquence, qu'elles ne se déplacent guère dans les couches supérieures du soleil et que celui-ci tourne autour de son axe en 27 jours environ. C'est au bout de ce temps que les mêmes points de la superficie se retrouvent sensiblement en face de la terre : il constitue la durée de la révolution synodique.

Le grand intérêt que ces taches ont pour nous, c'est qu'elles semblent causer certains phénomènes terrestres, qui atteignent leur maxima en même temps. Ce sont en première ligne les aurores boréales, puis les variations de l'aiguille magnétique.
Fig. 18. — Groupe de taches solaires, et granulations.
Cliché de l'observatoire de Meudon, du 1 avril 1884. À un moindre degré, l'apparition des nuages désignés sous le nom de cirrus, les variations de température, et plusieurs autres phénomènes météorologiques, dont nous nous occuperons au chapitre V, semblent en dépendre.

Autour des taches solaires on observe ce que l'on a désigné sous le nom de facules, qui sont des régions beaucoup plus brillantes que leur voisinage. Si l'on examine avec soin une image solaire très agrandie, on remarque que son apparence est toute grenue (fig. 18). Langley la compare à un drap gris blanc, presque recouvert de flocons de neige. On appelle « pores » les parties les plus obscures, et « grains » les parties plus lumineuses. On semble bien d'accord sur ce que ces grains représentent des

nuages qui, tout comme ceux de la terre, se produisent au sommet des courants atmosphériques ascendants. Tandis que dans notre atmosphère, les nuages consistent en gouttes d'eau ou en cristaux de glace, les grains solaires sont probablement formés par une suie, qui n'est que du carbone condensé, et un métal, par exemple, des gouttelettes de fer. — Le plus petit de ces grains que l'on puisse observer a un diamètre d'environ 200 kilomètres.

Les facules sont le résultat d'agglomération d'amas de nuages particulièrement importants, portés par de fortes masses atmosphériques, très étendues et qui s'élèvent en s'éloignant du centre du soleil. Les taches, par contre, correspondent à des masses gazeuses qui descendent vers ce centre, tout en subissant une élévation de température. Elles peuvent par conséquent être considérées comme « sèches » et elles ne contiennent aucun nuage, absolument comme les anticyclones terrestres. Nous pouvons, par suite de cela, apercevoir par ces trous qui se forment dans la paroi solaire extérieure, la masse gazeuse centrale, et obtenir quelques notions sur la constitution des parties profondes du soleil. Cependant l'épaisseur de la couche nuageuse ainsi percée est encore très faible, comparée au rayon même du globe solaire.

L'astronome français, M. Faye, a plusieurs fois observé une structure spiraloïde des parois des taches, ce qui était indicatif d'un mouvement tourbillonnaire des gaz et des nuages autour de leur centre. Cette observation a été faite à nouveau en 1908 en Amérique par M. Hale. Ce dernier a constaté également un singulier doublement de quelques raies spectrales des taches, dont la lumière était d'ailleurs polarisée, absolument comme dans les phénomènes découverts par Zeeman, qui accompagnent le passage d'un rayon lumineux à travers un puissant champ magné-

tique. Hale en a conclu que le tourbillonnement de la

Fig. 19. — Partie du spectre solaire, du 3 janvier 1875, d'après Langley. Les deux lignes claires horizontales sont données par des protubérances. Au centre, la ligne de l'hydrogène F, très déformée par suite d'énormes mouvements gazeux. tache entraîne une importante quantité d'électricité, ce qui a pour résultat la création d'un fort champ magnétique. Toutefois il subsiste encore quelques difficultés inhérentes à cette nouvelle explication du phénomène.

La meilleure manière d'étudier la nature des diverses parties du soleil est de se servir du spectroscope. Les images que donne cet instrument ne nous apprennent pas seulement quels sont les éléments constitutifs de la région examinée, mais encore quelle est la vitesse avec laquelle ces éléments se meuvent. C'est ainsi que nous avons appris qu'au-dessus de la couche de nuages brillants qui entourent le soleil et qui rayonnent sur nous, il existe des masses gazeuses qui contiennent la plupart des éléments constitutifs du globe terrestre. On y reconnaît en particulier le fer, le magnésium, le calcium, le sodium, l'hélium et l'hydrogène. Les derniers d'entre ces éléments, qui sont de beaucoup les plus légers, existent avec une particulière abondance dans les couches de l'atmosphère les plus éloignées du centre. Cette atmosphère devient visible pour nous, quand, dans les éclipses, le disque lunaire est parvenu à recouvrir suffisamment le soleil pour que les nuages si puissamment lumineux de la photosphère soient cachés à nos yeux. Par suite de la forte proportion d'hydrogène qu'elle contient, elle brille en général avec la coloration pourpre, caractéristique pour cet élément. C'est pourquoi on appelle en général cette couche extérieure la chromosphère (du grec χρώμα, couleur). Sa puissance est de 7 à 9 000 kilomètres. Elle

envoie au loin, dans l'espace, des rayons lumineux qu'on ne saurait mieux comparer qu'aux graminées d'une prairie (fig. 20 et 23).

Fig. 20. — Protubérance métallique, présentant un mouvement tourbillonnaire. Le cercle blanc donne la dimension, à la même échelle, du globe terrestre

Fig. 22. — Protubérance calme, ayant la forme d'un panache de fumée.
Fig. 23. — Protubérance calme, arborescente. Le cercle blanc représente la terre.

Ces flammes s'élèvent parfois beaucoup plus haut, et dans ce cas nous leur donnons le nom de protubérances. Le nombre de celles-ci, ainsi que leurs dimensions, augmentent avec l'importance des taches. On peut les classer en protubérances métalliques et en protubérances quiescentes. Les premières sont animées de mouvements particulièrement violents, ce dont on peut se rendre compte par les figures 20 et 21. Elles contiennent d'abondantes quantités de vapeurs métalliques. Elles ne se produisent que dans les zones où déjà l'on observe les taches, qui ont leur développement maximum à 20 degrés environ de l'équateur solaire. Leurs mouvements sont si violents que la vitesse de leurs matières constituantes atteint fréquemment plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Le savant hongrois M. Fényi a observé, le 15 juillet 1895, une de ces protubérances dont la plus grande vitesse, mesurée dans la direction du rayon visuel de la terre au soleil, et à l'aide du spectroscope, atteignait 860 kilomètres à la seconde. Perpendiculairement à cette direction, la vitesse était de 840 kilomètres ! Cette colossale vitesse est propre aux parties les plus éloignées du centre, tandis que les parties les

plus basses, qui sont nécessairement les plus denses, les plus chargées de vapeurs métalliques, sont moins mobiles, ainsi qu'on le conçoit aisément. La hauteur qu'atteignent ces protubérances au-dessus de la superficie solaire peut aller des chiffres considérables, ce qui est également vrai pour les protubérances tranquilles. Celle dont il vient d'être question, du 15 juillet 1895, avait 500 000 kilomètres de hauteur. Le 7 octobre 1880, Langley en a observé une de 560 000 kilomètres, dont par conséquent l'extrémité atteignait presque la distance d'un rayon solaire au-dessus du bord, ou au-dessus de la photosphère. En général elles ont 40 000 kilomètres environ.

La liste des protubérances enregistrées est très considérable. Lors de leur première découverte par le professeur Vassenius, de Göteborg, en 1733, on ne pouvait les apercevoir que pendant des éclipses solaires totales. Mais, à partir de 1868, il est devenu possible de les observer à tout moment, en pleine

Fig. 24. — Figure schématique, montrant la différence entre le spectre d'une tache et celui de la photosphère. Certaines lignes se trouvent agrandies dans la tache, d'autres sont affaiblies. Au milieu, deux « inversions », à droite, deux « bandes ». (D'après Mitchell.)

lumière solaire, à l'aide du spectroscope, ainsi que l'ont fait voir MM. Lockyer et Janssen.

Les protubérances quiescentes sont formées presque exclusivement d'hydrogène et d'hélium. Parfois elles contiennent des traces de gaz métalliques. Elles ressemblent en général à des nuages suspendus dans l'atmosphère, ou encore à des fumées qui seraient sorties d'une cheminée. Elles se produisent partout à la surface du soleil, et leur stabilité est si grande, qu'il arrive parfois qu'on peut les suivre pendant toute la durée d'une rotation et

plus, c'est-à-dire pendant environ quarante jours. Cela arrive par exemple, quand elles se produisent dans le voisinage des pôles, où l'on peut les apercevoir sans interruption au delà du bord solaire. Les figures 22 et 23 représentent quelques-unes de ces protubérances, d'après Young.

Quelquefois on peut voir retomber la matière qui forme ces protubérances, vers le centre du soleil, et arriver entre l'amas des petites flammes que nous avons comparées à des graminées (fig. 21). Le plus souvent cependant, elles semblent disparaître. Elles perdent leur chaleur par suite du rayonnement, et deviennent invisibles. Les protubérances tranquilles,

Fig. 25. — Spectre d'une tache solaire. En haut et en bas, spectre de la photosphère ; au milieu, celui de la tache, bordé de celui de la pénombre, aux bords de la tache (D'après Mitchell.)

qui semblent flotter à des altitudes de 50 000 kilomètres et au delà, doivent se trouver là dans une région dépourvue de toute atmosphère. Leurs particules ne peuvent donc pas être portées par des gaz environnants, comme le sont les gouttelettes de nos nuages terrestres. Si donc elles peuvent s'y maintenir, paraissant flotter, il faut nécessairement qu'elles soient soutenues par quelque force très particulière (la force répulsive) qui les éloigne du soleil (voir le chap. iv).

On peut étudier les facules par les mêmes procédés qui ont servi pour l'étude des protubérances. Assez récemment, MM. Deslandres et Hale ont construit, pour cette étude, un instrument tout à fait spécial, le spectrohéliographe (voy. fig. 26 à 29). Lorsque les facules s'approchent du bord apparent du soleil, elles paraissent particulièrement brillantes, ce qui est l'indice qu'elles se trouvent à des hauteurs considérables, et qu'à cause

de cela leur lumière ne peut plus être affaiblie par une couche de vapeurs qui les recouvrirait, si elles se trouvaient plus bas. Quand elles atteignent ce bord apparent,

Fig. 26. — La grande tache du 9 octobre 1903, photographiée à l'aide du spectrohéliographe de Greenwich. Cette figure est photographiée comme à l'ordinaire. Elle montre la tache à la hauteur moyenne des facules de calcium. Les deux figures suivantes montrent la même tache, photographiée plus bas et plus haut dans les mêmes facules de calcium. elles nous apparaissent souvent comme des renflements de la photosphère. Les nuages qui forment ces facules sont poussés vers l'extérieur par de puissants courants gazeux, qui s'élèvent par suite de la diminution de leur densité.

Les taches présentent beaucoup de particularités dans leurs spectres (voy. fig. 24 et 25). On y reconnaît d'une façon particulièrement nette la raie de l'hélium. Il en est de même de la raie du sodium, qui est très élargie, et qui montre, dans sa partie centrale, un trait lumineux, — ce qu'on appelle l'inversion des lignes. Cela indique que le métal se trouve répandu dans une couche épaisse. Dans la partie rouge du spectre on trouve des bandes spectrales, tout comme dans les spectres des étoiles rouges. Ces bandes, que des instruments très puissants réussissent d'ailleurs à résoudre en une infinité de lignes fines, indiquent

Fig. 27. — La grande tache du 9 octobre 1903. Photographie des parties inférieures des facules de calcium, obtenue à l'aide de la raie H (calcium) et au bord de cette ligne. La tache n'est pas recouverte par les facules, tout au moins pas dans la même étendue que dans les deux figures suivantes. l'existence de combinaisons chimiques. Les taches étant, en somme, relativement pauvres en lumière, leur spectre apparaît comme une bande peu éclairée qui

se détache sur le spectre de la photosphère. La partie violette du spectre d'une tache est particulièrement atténuée. Bien que la tache se présente évidemment comme un trou creusé dans la photosphère, et que, arrivée au bord apparent du soleil, elle fasse l'effet d'une entaille dans celui-ci, on a néanmoins fait cette observation qu'elle ne paraît pas plus obscure dans cette position. Cela semble indiquer que la lumière émise par la tache provient en majeure partie de ses parties extérieures, plus froides.

La lumière émise par les portions plus profondes des taches est évidemment absorbée en majeure partie par les couches
Fig. 28. — La grande tache du 9 octobre 1903. Photographie de la partie supérieure des facules de calcium, prise à l'aide de la partie moyenne de la raie H du calcium. — Les parties supérieures des facules recouvrent en grande partie la tache. Les facules s'étendent par conséquent beaucoup en s'élevant. extérieures. D'autre part les taches doivent se rétrécir en profondeur, par suite de la compression des gaz, et il s'ensuit que l'on peut considérer les parois nuageuses des entonnoirs qu'elles constituent, comme donnant les pénombres qui les bordent en apparence, et qui sont moins lumineuses que les parties environnantes (fig. 25). L'affaiblissement de la partie violette du spectre provient, très vraisemblablement, de la présence de fines poussières dans les gaz solaires, tout comme l'atténuation du spectre violet du bord apparent du soleil. Les bandes que l'on trouve dans la partie rouge du spectre proviennent probablement de lumière émanant des parties profondes de la tache, car toutes les parties périphériques de l'atmosphère solaire donnent des lignes simples et nettes. Ces bandes indiquent qu'en raison de la pression plus élevée qui existe dans les profondeurs du soleil, il peut s'y trouver des combinaisons chimiques

Fig. 29. — La grande tache du 9 octobre 1903. Photographie des facules d'hydrogène, faite à l'aide de la raie F de l'hydrogène. Les parties les plus accentuées de la tache sont seules visibles, les autres sont recouvertes et occultées par les masses d'hydrogène, qui montrent une violente agitation. tandis que celles-ci se décomposent quand elles arrivent vers la surface extérieure, où elles ne donnent plus que des raies simples comme celles produites par les éléments. Parmi les combinaisons que l'on a reconnues comme existant dans les taches, l'observatoire de Mount-Wilson a identifié les hydrures de magnésium et de calcium, ainsi que l'oxyde de titane.

Hale a étudié les spectres de divers corps introduits dans un arc électrique d'intensité variable. Cet arc était produit, tantôt par un courant de deux ampères, tantôt par seize ampères. L'arc a naturellement une température plus élevée quand le courant est plus intense. Mais lorsqu'on passe du courant fort au faible, le spectre change d'une façon fort caractéristique. Ce changement reproduit exactement celui qu'on observe si l'on fait passer le spectroscope de la surface unie du soleil à une tache. Hale en conclut que la tache est moins chaude que la photosphère. Ce fait provient sans nul doute de ce que la partie principale du rayonnement de la tache a son origine dans ses parties supérieures. Il serait prématuré de supposer que les parties profondes de la tache sont également plus froides que la photosphère.

Le même observateur a encore fait voir que le spectre des taches ressemble à un haut degré à celui de la grande étoile Arcturus. Il est suggestif de l'existence d'une atmosphère élevée, chargée de poussières, au-dessus des nuages photosphériques d'Arcturus, tout comme au-dessus du « fond » des taches.

Tout à fait à l'extérieur de la masse solaire, ou de son enveloppe gazeuse, on trouve l'énigmatique couronne, formée en apparence de rayons qui peuvent s'étendre au delà de ce qui nous apparaît comme un disque ou comme un globe. Ils peuvent avoir une longueur égale à plusieurs diamètres solaires. Les figures 30 à 32 donnent une idée de cette surprenante apparition.

Quand le nombre des taches solaires est faible, les rayons de la couronne s'étendent, semblables à d'immenses balais, à partir des régions équatoriales. En même temps les rayons plus faibles de cette couronne qui émanent des régions polaires sont ployés vers l'équateur absolument comme les lignes de force partant des pôles d'un aimant (fig. 30).

C'est cette apparence qui a fait admettre que le soleil agit comme un puissant aimant dont les pôles seraient situés dans le voisinage des pôles géographiques de l'astre.

Dans les années riches en taches solaires la répartition des rayons coronaux est plus uniforme (fig. 31). Si le nombre des taches est moyen, il semble qu'il y ait une forte émission de rayons de la couronne dans le voisinage de la zone d'agglomération de ces taches. Il en résulte fréquemment que la couronne prend un aspect de croix à quatre branches (fig. 32).

Fig. 30. — Photographie de la couronne solaire, en 1900 (d'après Abbot et Langley). L'aspect de la couronne est celle des années de minima des taches.

Ce qui précède s'applique à la couronne qu'on a convenu d'appeler extérieure. La partie intérieure a au contraire toujours une luminosité plus uniformément répandue. L'examen spectroscopique fait connaître que cette dernière est constituée principale-

ment par de l'hydrogène et par un gaz encore inconnu, qu'on a appelé coronium. Il se rencontre principalement dans les parties de la couronne intérieure les plus distantes du centre. La couronne rayonnante extérieure est au contraire productive de lumière dite continue, ce qui indique que cette lumière en particulier émane de matières solides ou fluides. On a cru voir, dans le spectre des parties les plus éloignées de la couronne extérieure, quelques lignes sombres sur

Fig. 31. — Photographie de la couronne solaire, en 1870 (d'après David).

Cette année était celle d'un maximum de taches. fond clair, tout comme dans le spectre de la photosphère. On en a conclu que cette lumière, provenant de la couronne extérieure est de la lumière réfléchie, d'origine solaire, qui nous est renvoyée par des parcelles minimes de matière, solides ou liquides. Que ce soit de la lumière réfléchie, cela résulte d'ailleurs de ce fait qu'elle est en partie polarisée. La forme rayonnante de cette couronne extérieure est donc fortement indicative de l'existence d'une force qui rejette loin du soleil des particules de matière extrêmement petites. C'est ce que nous appelons la force répulsive.

En ce qui concerne la température du soleil nous avons déjà vu que les deux méthodes employées pour la déterminer ont donné des résultats assez divergents. En partant du rayonnement, Christiansen, et après lui Warburg l'ont évaluée à 6 000 degrés environ. Wilson et Gray ont trouvé, pour le centre

Fig. 32. — Photographie de la couronne solaire en 1898 (d'après Maunder). L'activité solaire était moyenne à ce moment. du soleil 6 200 degrés, chiffre qu'ils ont rectifié plus tard, en le portant à 8 000 degrés. Par suite de l'absorption qui a lieu dans les atmosphères du soleil et de la terre on trouve toujours des valeurs trop

faibles. Cela est encore plus vrai pour les calculs qui prennent pour base l'autre méthode, celle qui se sert de la longueur d'onde correspondante à la portion du spectre la plus intensément calorifique fournie par les rayons du soleil. Le Chatelier a fait la comparaison de la lumière solaire filtrée à travers un verre rouge avec celle de diverses sources artificielles, filtrée de même, et dont la température était parfaitement connue. Il est arrivé par ce procédé à évaluer la température du soleil à 7 600° C. La plupart des savants sont cependant d'accord pour accepter le chiffre de 6 500 degrés de température absolue, correspondant approximativement à 6 200° C. C'est ce que l'on appelle la température « effective » du soleil. Si aucune portion du rayonnement n'était absorbée, cette température serait celle des nuages de la photosphère. La lumière rouge étant peu absorbée, le chiffre de 7 600 degrés trouvé par Le Chatelier, et celui presque concordant de 8 000 degrés, dû à Wilson et Gray, doit représenter à peu près la température moyenne des parties extérieures des nuages de la photosphère.

La température plus élevée des facules se déduit de leur plus grande puissance lumineuse. Celle-ci a cependant pour cause, en partie, leur hauteur plus grande. Carrington et Hodgson virent, le 1 septembre 1859, deux facules qui faisaient éruption du bord d'une tache. Leur luminosité était de cinq à six fois plus grande que celle des parties avoisinantes de la photosphère. Cela correspond à environ 10 000 ou 12 000° C. Il devient donc évident que les couches profondes du soleil, qui se faisaient jour par cette éruption, ont une température plus élevée, ce qui d'ailleurs va à peu près de soi, la partie extérieure devant forcément perdre de sa chaleur par le rayonnement.

C'est un fait bien connu que la température de notre atmosphère diminue à mesure qu'on s'élève, par suite du mouvement de l'air. Une masse atmosphérique qui descend vers la terre est comprimée par suite de la pression croissante. Sa température s'élève par voie de conséquence, exactement comme celle du briquet à air, dans l'expérience bien connue, lorsqu'on enfonce le piston de l'appareil. Si l'air était sec et animé d'un mouvement violent, sa température varierait de 10 degrés par kilomètre de hauteur. Si au contraire cet air était au repos, il aurait une température sensiblement uniforme qui ne diminuerait point, à mesure qu'on s'élève. En réalité on observe une variation qui est sensiblement une moyenne entre les deux valeurs extrêmes.

Or comme la force de gravitation dans la photosphère du soleil est sensiblement 27,4 fois plus grande qu'à la surface de la terre, on peut faire ce calcul, que, si l'atmosphère solaire avait la même densité qu'à la surface de notre globe, sa température varierait, pour une même hauteur, 27,4 fois plus que chez nous, c'est-à-dire de 270 degrés par kilomètre d'élévation, à supposer qu'elle soit agitée par de violents mouvements.

C'est ce qui arrive. La partie extérieure du soleil est précisément toujours très mouvementée, et notre hypothèse trouve plus que probablement son application. Toutefois cette partie de la masse est composée principalement d'hydrogène, qui est vingt-neuf fois plus léger que l'air atmosphérique. Il faut donc réduire à 1/29 le chiffre qui vient d'être calculé. En d'autres mots, la diminution de température doit être d'environ 9 degrés par kilomètre de hauteur. D'autre part le rayonnement de la surface solaire est extrêmement violent, et il est la cause que les effets tendent à s'atténuer, en sorte que 9 degrés est probablement une valeur en-

core trop grande. Plus près du centre du soleil les gaz ont une densité plus grande ; ils sont fortement comprimés par les couches extérieures, en sorte que leur compressibilité devient très faible. Aussi le calcul que nous venons de faire ne s'y trouve plus guère applicable. Il n'en est pas moins vrai qu'à mesure qu'on s'approche du centre, la température augmente. Si nous acceptions le chiffre qui vient d'être trouvé, de 9 degrés par kilomètre nous trouverions pour le centre du soleil une température d'environ 6 millions de degrés !

Tous les corps fondent et se résolvent en vapeur si on élève suffisamment leur température. Si l'on chauffe un corps au delà d'un certain degré qu'on appelle le point critique, on ne peut plus réduire cette vapeur à l'état fluide, quelle que soit la pression que l'on y applique. Il ne peut plus exister qu'à l'état gazeux. Si l'on compte les degrés à partir de –273° C, cette température est à peu près une fois et demie celle du degré de l'ébullition, sous la pression atmosphérique. Pour autant que nous pouvons en juger, d'après ce qui se passe sur notre globe, il est peu probable qu'aucun corps ait une température critique plus élevée que 10 000 à 12 000° C. C'est précisément la température la plus élevée qui ait pu être attribuée aux facules solaires. Il s'ensuit que l'intérieur du soleil est sans nul doute gazeux, et que sa substance entière n'est qu'une masse gazéiforme, puissamment comprimée, dont la température est extrêmement élevée. Malgré qu'elle soit gazeuse, sa densité est 1,4 fois celle de l'eau et elle ressemble par conséquent, sous plus d'un rapport, à un liquide. Elle doit être, par exemple, passablement visqueuse, ce qui expliquerait la grande stabilité des taches.

Le soleil est donc un globe gazeux, dans la partie extérieure duquel il se produit superficiellement quelques condensations nuageuses, par suite du rayonnement d'une part, des courants ascendants locaux, d'autre part. On a cherché à évaluer la pression de ces gaz aux endroits où se produisent les nuages, c'est-à-dire à la surface de la photosphère. On a cru pouvoir l'estimer à 5 ou 6 atmosphères. En raison de la valeur très grande de la force de gravitation, cette pression suppose l'existence d'une couche gazeuse plus extérieure ayant pour épaisseur seulement un cinquième de celle de l'atmosphère terrestre. Dans notre mer aérienne cela correspond à environ 11 500 mètres. C'est la hauteur que nous donnons aux cirrus les plus légers, qui ne sont pas sans une certaine ressemblance apparente avec les nuages de la photosphère.

Retournons maintenant à la question que nous avons abandonnée pour un instant plus haut, à savoir, d'où vient, au soleil, l'énergie qui remplace celle répandue sans cesse par le rayonnement dans les espaces célestes.

Les sources de chaleur les plus puissantes qui nous soient connues sont les combinaisons chimiques, dont la plus usuelle pour nous est celle qui résulte de la combustion du charbon. Chaque fois qu'un gramme de carbone est brûlé, 8 000 calories se trouvent libérées. Supposons un instant que le soleil ne soit qu'un bloc homogène de carbone. Sa combustion produirait une quantité d'énergie qui serait épuisée au bout de 4 000 années. Rien d'étonnant à ce que tous les chercheurs qui ont voulu faire cette hypothèse et en déduire des conséquences, l'ont vite abandonnée. Faye, l'astronome français très connu, a essayé de tenir un certain compte de cette production de chaleur par voie de

combinaison, au moyen d'une hypothèse auxiliaire. Il admettait que le noyau du soleil était à une température si élevée qu'aucune combinaison ne pouvait y subsister, et que tous les corps s'y trouvaient résolus dans leurs éléments constituants. Les atomes de ces éléments, arrivant à la couche extérieure de l'astre, entraient par contre en combinaison, en développant de la chaleur. Il supposait donc qu'un continuel mouvement amenait à la surface des éléments combinables, causant ainsi une perpétuelle production de chaleur. Il est cependant aisé de voir que si de nouvelles masses arrivent constamment du centre à la périphérie, celles qui s'y trouvent déjà doivent retourner à l'intérieur, pour y être de nouveau résolues en leurs éléments. Cette décomposition absorberait tout juste la même quantité de chaleur que celle qui a été libérée par la combinaison, et le mouvement supposé ne servirait absolument qu'à transporter à la surface la chaleur latente en même temps que la matière. Le calcul de cet apport est faisable. Si l'on évaluait à 6 millions de degrés la température moyenne du soleil, la chaleur spécifique de la matière constituante étant supposée égale à l'unité, le procédé décrit suffirait pour alimenter pendant 3 millions d'années le rayonnement calorifique tel que nous le connaissons.

Nous avons d'ailleurs vu que les parties périphériques du soleil ont ceci de particulier que le spectre de leur émission lumineuse accuse la présence d'éléments simples ou dissociés, tandis que dans la profondeur des entonnoirs des taches nous rencontrons des combinaisons chimiques, ce que prouvent des bandes spectrales continues. Il est tout à fait inexact de dire que des températures très élevées détruisent toutes les combinaisons sans exception. La thermodynamique nous apprend seulement que par des températures croissantes, il se produit des corps dont la for-

mation va de pair avec une absorption de chaleur. Ainsi par exemple, l'ozone peut se transformer en oxygène à une température élevée, malgré que l'ozone soit de constitution moléculaire plus complexe que n'est l'oxygène. La production d'un gramme d'ozone exige l'absorption de 750 calories. Nous savons encore que dans l'arc électrique, à une chaleur d'environ 3 000 degrés, il se fait une combinaison de l'oxygène et de l'azote de l'air, en même temps qu'il y a absorption de chaleur ; la méthode encore toute récente de la fabrication de l'acide azotique extrait de l'atmosphère repose sur ce phénomène. On peut citer encore la production de corps bien connus, le benzol et l'acétylène, par la combinaison directe de leurs constituants, le carbone et l'hydrogène. Elle a lieu avec absorption de chaleur. Tous ces corps ne peuvent être fabriqués par la combinaison directe de leurs éléments qu'à des températures très élevées. Enfin l'expérience nous prouve qu'en général, plus la température nécessaire pour produire un composé chimique est élevée, plus est importante aussi l'absorption de chaleur.

Une loi tout analogue est vraie en ce qui concerne la pression. À mesure qu'on augmente celle-ci, on favorise les évolutions chimiques qui donnent des produits ayant un plus faible volume qu'avant. Supposons qu'une masse gazeuse soit précipitée de la périphérie du soleil vers le centre de celui-ci, comme cela arrive dans les entonnoirs des taches. Elle va se trouver dans un milieu dont la pression est de plus en plus élevée. Elle augmente d'environ 3 500 atmosphères par kilomètre de profondeur ! La conséquence en sera donc la production de combinaisons moléculaires de plus en plus complexes. Les gaz qui, à la pression très faible et dans la température élevée de la périphérie, se sont résolus en atomes, arrivés dans les profondeurs de la masse, entreront dans

des combinaisons chimiques, comme nous l'a appris l'examen spectroscopique. Par suite de la température élevée ambiante, ces combinaisons absorbent des quantités énormes de chaleur dans leur formation. Ces quantités sont par rapport à celles qu'absorbent sur notre globe les combinaisons analogues, à peu près comme la température du soleil est à celle de notre terre. Plus ces gaz pénètrent vers le centre, plus la pression et la température s'élèvent. Il se fera des combinaisons de plus en plus riches en énergie et moins volumineuses.

Il faut donc nous rendre compte que dans la partie centrale du soleil il existe des corps qui, ramenés à la surface, se dédoubleront, se décomposeront avec une grande libération de chaleur et une grande augmentation de volume. Il faut les considérer comme des explosifs d'une puissance énorme, en comparaison desquels la dynamite et les picrates ne sont que des joujoux. Cela se confirme par cette observation que des gaz, pénétrant à travers les nuages de la photosphère, forment des jets, qui sont les protubérances, animées d'une vitesse de plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Ce sont là des vitesses plusieurs milliers de fois plus grandes que celles des projectiles de nos armes. L'énergie des explosifs qui se trouvent ainsi réunis dans l'intérieur du globe solaire est donc beaucoup plus d'un million de fois celle de nos explosifs artificiels terrestres, car l'énergie contenue dans un corps augmente comme le carré des vitesses qu'elle produit. C'est pourquoi aussi le passage de ces explosifs de l'intérieur à la périphérie leur a déjà fait dépenser une grande partie de l'énergie contenue.

Voilà ce qui explique que l'énergie solaire, au lieu de se dépenser en 4 000 ans, ce qui correspondrait à la combustion d'un so-

leil constitué uniquement par du carbone, peut suffire pour l'alimenter pendant 4 000 millions d'années, et peut-être beaucoup plus encore, probablement même jusqu'à plusieurs billions d'années.

L'existence de combinaisons possédant une énergie comparable à celle que nous supposons a été prouvée par la découverte de la production de chaleur d'une façon continue du radium. D'après Rutherford le radium se détruit ou se transforme à moitié dans un espace d'environ 1 900 ans. Il développe pendant ce temps une quantité de calorique d'environ un million de calories par gramme et par année. Il en résulte que la transformation de ce corps en ses produits de désagrégation finale est accompagnée d'un développement de chaleur de quelques milliards de calories, ce qui est environ deux cent cinquante mille fois plus que ne donnerait la combustion d'un gramme de carbone.

La terre n'est donc, une fois de plus, qu'un pygmée à côté du soleil quand on se place sur le terrain de la chimie et de ses combinaisons. Nous avons de sérieux motifs pour admettre que l'énergie chimique du soleil a suffi, et suffit encore, pour entretenir la chaleur solaire pendant plusieurs milliards d'années, et vraisemblablement pendant plusieurs billions d'années.

Nous rappelons ici que la décomposition de la lumière par le prisme peut produire trois sortes principales de spectres. Ce sont :

1 Le spectre continu qui répond à la notion générale que nous avons de cette décomposition. C'est une série de couleurs se fondant l'une dans l'autre par des graduations insensibles, et allant du rouge à une extrémité, au violet, à l'autre. La science recon-

naît dans les régions qui dépassent le spectre visible à nos yeux, des rayons ultra-rouges et des rayons ultra-violets. Leur continuité avec la partie visible du spectre est aussi complète que celle-ci. — Le spectre continu est l'indice que le corps d'où provient la lumière analysée est solide et porté à l'incandescence.

2 Le spectre de raies lumineuses ou brillantes. La continuité du spectre est remplacée par une ou plusieurs lignes colorées, qui occupent, dans la dispersion de la lumière analysée, la même place que leur couleur dans le spectre continu. Les intervalles entre elles sont sans lumière. — Ces raies brillantes proviennent d'une lumière émise par un gaz porté à l'incandescence.

3 Le spectre de bandes. Celui-ci comprend des portions de spectre en apparence continu, mais occupant seulement certaines régions de celui-ci, avec des intensités de coloration relativement différentes. Avec une grande dispersion

Le spectre de la lumière solaire et parfois d'autres spectres continus sont traversés par une multitude de raies noires, dont la place est aisément reconnue pour être la même que celle des raies brillantes du spectre des gaz simples. C'est ce qu'on nomme le spectre d'absorption. Il résulte de ce que la lumière émanant d'un corps solide incandescent traverse, pour parvenir à l'instrument d'analyse, un gaz porté à l'incandescence et dont les raies lumineuses seront transformées en raies noires.

Le spectre dit normal, dont il est question p. 77, est obtenu à l'aide d'un réseau à la place de prismes, afin de rendre proportionnelle aux longueurs d'onde la dispersion des rayons.

04

L'arithmétique et la géométrie très élémentaire mises à part, l'astronomie semble avoir été la science la plus anciennement cultivée. Que le soleil fut la source première de toute vie et de tout mouvement, on ne s'en est rendu compte d'une façon parfaitement claire que vers le milieu du siècle dernier ; mais déjà aux époques historiques les plus reculées on avait quelques notions sur l'énorme importance qu'il a pour notre globe. Dans la vie des peuples nomades qui habitent les pays chauds, la lune tenait une grande place. Ses phases successives fournissaient le moyen le plus commode pour compter des durées plus grandes que la journée. D'autre part la chaleur du soleil est si oppressive, particulièrement en été, que ces peuples utilisaient de préférence la nuit et la clarté lunaire pour leurs déplacements à la recherche de nouveaux pâturages pour leur bétail. C'est ainsi que chez les Babyloniens par exemple, la lune fut primitivement la divinité principale ; le soleil ne le devint que plus tard.

La vénération du soleil et de la lune à la douce clarté s'étendit bientôt aux luminaires moins importants de la voûte céleste. On fit en effet l'observation que leurs positions dans le ciel concordaient avec les variations annuelles des saisons, dont l'influence était déjà si marquée sur toutes les entreprises humaines. On en vint donc à attribuer à la lune et aux étoiles le pouvoir de régir le temps, et par voie de conséquence, également tous les faits et gestes des humains. Nous savons aujourd'hui que cette attribution d'influence n'est fondée sur rien. Avant de se lancer dans n'importe quelle entreprise, on s'assurait de la constellation heureuse des corps célestes. C'est ainsi que s'établit petit à petit, dès les temps les plus reculés, le pouvoir énorme sur la foule igno-

rante et superstitieuse de ceux qui prétendaient interpréter le firmament.

Ces superstitions étaient encore profondément enracinées lorsque Newton parvint à démontrer, en 1686, que les mouvements des étoiles vagabondes, c'est-à-dire des planètes, ainsi que de leurs satellites, pouvaient se calculer à l'aide d'une loi des plus simples. Cette loi dit que tous ces corps célestes sont attirés vers le soleil ou vers leur astre central, par une certaine force qui est à la fois proportionnelle à leur masse et à celle de cet astre central, et inversement proportionnelle au carré de leurs distances. Halley, le contemporain de Newton, appliqua cette même théorie aux si mystérieuses comètes, et depuis cette époque, l'astronomie mathématique a pour fondement une loi solidement établie, à laquelle on n'a encore pu découvrir aucune exception.

Le monde s'est trouvé ainsi libéré du coup, et définitivement, des superstitions paralysantes de l'astrologie, qui étaient liées à la croyance en une mystérieuse domination des corps célestes. Il n'est pas étonnant que les contemporains de Newton, comme aussi leurs successeurs, aient estimé cette découverte supérieure à toutes les autres, faites par ce héros de l'humanité. D'après cette loi de Newton toutes les masses de matière qui remplissent l'univers, ont une tendance à se réunir, à se joindre petit à petit, et l'évolution du monde se fait dans le sens de l'absorption des petits d'entre ses éléments, — les météorites par exemple —, par les grands.

Il convient toutefois de remarquer que déjà Kepler, le grand prédécesseur de Newton, avait observé dès 1618, que la matière composant les queues des comètes était repoussée par le soleil. Il croyait, comme plus tard Newton, que le rayonnement de la lu-

mière avait pour origine de petits corpuscules lumineux projetés dans tous les sens par le soleil, comme par tout autre corps éclairant. Ceux-ci viennent ils à rencontrer les atomes de poussière des queues cométaires, ils les entraînent, ce qui expliquerait la répulsion qu'exerce le soleil. Il est très remarquable que Newton ne consentit pas à accepter cette explication, bien qu'il partageât l'opinion de Kepler sur la nature de la lumière. D'après lui, l'anomalie que présentaient les comètes, en s'écartant de sa loi de la gravitation universelle, n'était qu'apparente ; ces queues offraient le même paradoxe que la colonne de fumée qui sort d'une cheminée, et qui monte, parce que les gaz dont elle est formée sont plus légers que l'air environnant, bien que les gaz soient attirés vers la terre. Cette explication, dont Newcomb trouva bon de dire « qu'on ne peut plus lui accorder une importance sérieuse », fait bien voir comment Newton était désireux de tout expliquer à l'aide de sa loi.

Les astronomes ont depuis lors fidèlement suivi les traces de ce maître incomparable qu'était Newton. Ils ont écarté tout ce qui n'entrait pas rigoureusement dans le cadre de son système. Le célèbre Euler fit exception, lorsqu'en 1746, il formula l'hypothèse que les ondes lumineuses exerçaient peut-être une certaine pression sur les corps qu'elles viennent frapper. Cette opinion ne put cependant pas résister aux critiques qu'elle souleva et qui furent soutenues surtout par de Mairan. Le bien fondé de l'opinion d'Euler a été démontré beaucoup plus tard, en 1873, par Maxwell, dans son célèbre travail sur la nature de l'électricité. Ce savant fit voir que les rayons calorifiques exercent une pression, dont la grandeur a pour mesure la quantité d'énergie contenue dans l'unité de volume, par suite de la radiation. Bartoli a montré en 1876 que cela est également vrai pour les radiations de toute

sorte. Maxwell a calculé la valeur de cette pression, et il la trouva si minime qu'on ne pouvait guère la mesurer à l'aide des moyens dont on disposait alors. Plus tard, on y est parvenu, par des expériences et des mesures faites dans le vide. Nous les devons au professeur russe Lebedeff et aux Américains Nichols et Hull (1900, 1901). Ces savants ont prouvé que cette force, que l'on désigne sous le nom de force répulsive ou de pression de radiation a exactement la valeur indiquée par Maxwell.

Malgré la situation éminente de Maxwell dans le monde scientifique, les astronomes négligèrent la loi si importante qu'il avait découverte. En 1892 Lebedeff essaya bien de l'appliquer, dans un travail sur les queues cométaires, qu'il considérait comme gazéiformes. Or la loi de Maxwell ne s'applique précisément pas à cette forme de la matière. Ce n'est qu'en 1900, peu avant que le même Lebedeff fournit la preuve expérimentale de l'exactitude de la loi, que je m'efforçai de faire ressortir sa très grande signification pour l'explication d'un certain nombre de phénomènes célestes.

Àla surface du soleil, la grandeur de la pression de radiation est de 2,75 mgr. par centimètre carré, à supposer que les rayons tombent perpendiculairement à la surface d'un corps noirci. En partant de là, je cherchai quelle devrait être la dimension d'une gouttelette qui aurait le même poids spécifique que l'eau, et qui pourrait rester en équilibre avec la force attractive du soleil, se trouvant au voisinage immédiat de celui-ci. Ce résultat serait atteint si le diamètre de la gouttelette était de 0,0015 mm. Une correction à ce calcul est due à Schwarzschild. Il a fait voir qu'il n'est exact que si cette gouttelette réfléchit d'une façon parfaite tous les rayons qu'elle reçoit. Si son diamètre est plus petit, la force ré-

pulsive l'emportera sur l'attraction, — elle sera chassée loin du soleil. Cependant, suivant Schwarzschild, ce fait ne peut encore se produire que si la circonférence de la gouttelette est plus grande que les 0,3 de la longueur d'onde des rayons incidents ; c'est une restriction dont l'origine se trouve dans les lois de la diffraction de la lumière.

La gouttelette diminue-t-elle davantage, la pesanteur reprend son influence prépondérante. Mais entre les deux limites ainsi déterminées, il y a répulsion effective. On peut en conclure que les molécules qui auront des dimensions inférieures à la plus petite valeur trouvée ci-dessus, ne seront pas chassées, et que, par conséquent on ne doit pas appliquer la loi de Maxwell aux gaz.

Le maximum de l'effet de la force répulsive se produit quand la circonférence de la gouttelette est précisément égale à la longueur d'onde de la radiation. Elle est alors dix-neuf fois supérieure à l'effet de la pesanteur. — Tous ces résultats s'appliquent uniquement à des gouttes dont la surface opère la réflexion totale des rayons, dont la densité égale celle de l'eau, et pour une radiation et une attraction égales à celles du soleil. La lumière solaire n'est toutefois pas homogène ; il en résulte que l'effet maximum se trouve un peu diminué, et la pression est, en fin de compte, environ dix fois plus grande que la pesanteur, quand il s'agit de gouttelettes de 0,00016 mm. de diamètre.

Avant d'attribuer à l'existence d'une force de radiation les phénomènes correspondants, tels qu'on les observe dans les queues des comètes, on admettait en général avec Zöllner que cette répulsion était due à des forces électriques. Il est en effet hors de doute que l'électricité joue ici un très grand rôle, comme nous le verrons plus tard. Une découverte faite par C. T. R. Wil-

son en 1899 en donne l'explication. Des influences extérieures diverses peuvent rendre les gaz conducteurs d'électricité. On dit alors qu'ils sont ionisés, ce qui signifie qu'ils contiennent des ions libres, ou, en d'autres mots, des particules excessivement petites, chargées d'électricité positive ou négative. Cet état d'ionisation des gaz peut être produit, entre autres, par des rayons Röntgen, par des rayons cathodiques, par de la lumière ultraviolette, ou encore par une très forte élévation de température. Comme les rayons solaires contiennent une très grande proportion de rayons ultraviolets, il est hors de doute que les masses gazeuses qui arrivent au voisinage du soleil, par exemple celle des comètes qui en approchent, sont au moins partiellement ionisées, et qu'elles contiennent par suite des ions positifs et des ions négatifs.

Les gaz ionisés ont cette propriété très remarquable, de pouvoir condenser des vapeurs. Wilson a fait voir que cette propriété appartient à un bien plus haut degré aux ions négatifs qu'aux ions positifs, lorsqu'il s'agit de la condensation de l'eau. Si donc il se trouve dans le voisinage du soleil des vapeurs aqueuses, qui se refroidissent et se condensent, les gouttes ainsi formées se déposent tout d'abord sur les ions négatifs. Ces gouttes sont-elles ensuite chassées par la pression de radiation, ou encore tombent-elles en raison de leur poids, comme dans l'atmosphère terrestre, elles emporteront avec elles la charge électrique négative, tandis que la portion correspondante d'électricité positive restera dans le gaz, — dans l'air par exemple. C'est ainsi que les charges d'électricité positives et négatives sont séparées les unes des autres, et que des décharges électriques peuvent s'ensuivre, lorsque des quantités suffisantes en ont été accumulées.

Fig. 33. — Photographie de la comète de Roerdam (1893, II), présentant plusieurs gros noyaux dans la chevelure.

Ces décharges rendent lumineux les gaz par lesquels elles passent, quoique leur température puisse être extrêmement basse. Il a même été démontré par M. Stark qu'une basse température est favorable à la production de phénomènes lumineux très brillants.

Nous avons déjà indiqué plus haut que, dès le commencement du xvii siècle Kepler était d'opinion que le soleil repoussait la queue des comètes. Newton fit voir comment on peut calculer leur vitesse, en prenant pour point de départ la forme de ces queues. Il est préférable cependant de déduire cette vitesse de l'observation directe. Elles ne sont en effet nullement

Fig. 34. — Comète de Swift (1892, I). uniformes, comme on les représente en général sur les images, mais elles contiennent fréquemment plus d'un centre ou noyau (fig. 33) dont le mouvement peut être directement aperçu et mesuré.

Olbers a conclu de ses études cométaires, au commencement du siècle dernier, que la répulsion des queues des comètes par le soleil était inversement proportionnelle au carré de leur distance, c'est-à-dire que cette force répulsive suit les mêmes lois de variation que la gravité. Il devient possible, dès lors, d'exprimer la force répulsive par comparaison avec la gravitation vers le soleil, et cette façon de mesure a été universellement adoptée. Il est naturel que la force répulsive varie ainsi avec la distance, car la radiation que reçoit une surface donnée

Fig. 35. — Comète de Donati, lors de sa plus forte luminosité, en 1858. est aussi inversement proportionnelle au carré de la distance du corps radiant, c'est-à-dire dans ce cas, du soleil.

Au siècle dernier l'astronome russe Bredichine fit un grand nombre de mesures de la force qui éloignait les queues des comètes du soleil. Il crut, sur la foi de ces déterminations, pouvoir les classer en trois catégories. Dans la première, la répulsion était dix-neuf fois plus grande que l'attraction due à la gravitation. Dans la seconde elle variait de 3,2 à 1,5 fois ; dans la troisième catégorie la répulsion l'emportait d'une fois à une fois et demie sur la pesanteur. On a cependant trouvé des valeurs supérieures encore pour un certain nombre de comètes. Ainsi Hussey a fait ce calcul pour une comète de 1893 (la comète de Roerdam : 1893, II) et il a trouvé que la répulsion était trente-sept fois la force de gravité. La comète de Swift (1892, I, voy. fig. 34) a donné un rapport plus élevé encore, savoir 40,5. Certaines comètes nous ont montré des queues de formes très diverses, comme celle, restée célèbre, de Donati (fig. 35). Les deux queues presque rectilignes de cette comète appartenaient à la première catégorie de Bredichine, la troisième, très recourbée, était de la deuxième catégorie.

Nous avons indiqué plus haut, que d'après Schwarzschild des gouttelettes de matière ayant une surface parfaitement réfléchissante, et d'une densité égale à celle de l'eau, étaient repoussées par le soleil avec une force qui pouvait atteindre dix fois leur poids. Si la gouttelette est au contraire d'une matière parfaitement absorbante, cette valeur diminue de moitié. Or des observations spectroscopiques sur les comètes font penser que les gouttelettes qui les composent sont probablement des hydrocarbures, qui ne sont pas parfaitement absorbantes, mais elles sont partiellement traversées par la radiation solaire. Si on leur applique le calcul, on trouve que l'effet de la radiation peut atteindre 3,5 fois celui de la gravité.

Des gouttes plus fortes donneraient des chiffres moins élevés. Il semble donc que les catégories 2 et 3 de Bredichine répondent parfaitement à ces conditions dont le point de départ est l'évaluation théorique de la pression de radiation.

On explique moins facilement comment il peut exister des forces répulsives aussi élevées que celles de la première catégorie de Bredichine, ou celles des comètes de Swift et de Roerdam. Si une gouttelette d'hydrocarbure est exposée à une forte radiation solaire, elle est en fin de compte tellement chauffée, qu'elle se carbonise. Elle se transforme alors en un charbon spongieux, par suite du dégagement des gaz qui s'en échappent, qui sont surtout composés d'hydrogène. Ces particules doivent beaucoup ressembler aux corpuscules charbonneux qui tombent des fumées de nos cheminées. On peut concevoir que ces petits charbons, consistant en margarites feutrées, c'est-à-dire en rangées ressemblant à des chaînes de bacilles, aient une densité de 0,1 seulement, si on les prend avec les gaz qui y sont enfermés (comp. p. 115). Une gouttelette absorbante ayant cette densité peut, dans certaines conditions, subir une répulsion qui va jusqu'à quarante fois la force d'attraction du soleil lui-même. On peut donc, par ces considérations, arriver à se faire quelque idée de la grandeur des forces répulsives si importantes du soleil.

Les spectres des comètes confirment en tous points les conclusions auxquelles conduit la théorie de la pression de radiation. Elles présentent un très faible spectre continu qui provient sans doute de la lumière solaire réfléchie par les petites particules composantes. On remarque en outre, comme il a été dit, un spectre d'hydrocarbures gazeux et de cyanogène. Ces bandes spectrales sont dues à des décharges électriques, car on les ob-

serve sur des comètes dont l'éloignement du soleil est tel qu'elles ne peuvent pas être lumineuses par l'élévation de leur température propre. On a remarqué dans la queue de la comète de Swift, des spectres de bandes dans des régions éloignées du noyau de 5 000 000 de kilomètres environ. Les décharges électriques proviennent principalement des parties extérieures de la queue, là où, d'après la théorie, les forces électriques sont les plus puissantes. Cela expliquerait également ce fait que les queues cométaires semblent entourées d'une sorte de manteau extérieur lumineux.

En photographiant les comètes on observe parfois, d'après M. Deslandres, une luminosité singulière, invisible à l'œil, qui se montre au milieu du cône visible de la chevelure. Il est probable que cette lumière photographiquement active est due à des décharges électriques à l'intérieur de la queue. Elle serait de signe contraire à celle des particules chargées d'électricité de l'enveloppe extérieure du manteau.

Lorsqu'une comète s'approche du soleil, d'autres matières, moins volatiles, se vaporisent à leur tour. On trouve alors dans le spectre les lignes du sodium. Quand la proximité du soleil est très grande, on aperçoit même les lignes du fer. Il semble évident que ces lignes proviennent des matières échappées du noyau lui-même, qui consiste sans doute, comme les météorites qui tombent sur notre globe, principalement en silicates, — parmi lesquels du silicate de soude, — et en fer.

On se représente aisément comment ces gouttelettes se forment. Lorsqu'une comète s'approche du soleil on remarque qu'une certaine quantité de matière est expulsée du noyau, par la face tournée vers le soleil. Ce phénomène correspond à celui de la

formation des nuages dans notre propre atmosphère, par une chaude journée d'été. Cette évaporation produit ce qu'on appelle la calotte, qui ressemble, à la vue, à une mince enveloppe hémisphérique, autour de la face du noyau qui regarde le soleil. On constate parfois la présence de deux ou même de plusieurs de ces calottes concentriques, qui correspondent à des couches de nuages terrestres situées à des hauteurs différentes. La partie postérieure de cette calotte laisse échapper la matière de la queue, du côté opposé au soleil. En général, les queues des comètes sont plus développées pendant leur approche du soleil que lorsqu'elles s'en éloignent. La raison en est sans doute, comme on l'a depuis longtemps supposé, que les hydrocarbures sont en majeure partie détruits pendant le passage au périhélie. On a cru remarquer aussi que les comètes dites périodiques qui reviennent près du soleil à intervalles réguliers ont une chevelure de moins en moins développée à chaque révolution.

La lumière des comètes est beaucoup plus vive lors des périodes de maxima des taches solaires. On peut admettre qu'à ces moments-là les espaces environnant le soleil sont relativement très chargés de fines poussières, qui peuvent parfaitement
Fig. 36. — Expérience de Nichols et Hull, pour la reproduction des effets des queues de comète. La lumière d'une lampe à arc est projetée à travers une loupe, sur de fines poussières tombant d'un orifice. aider à la condensation des matières formant la queue des comètes. Il est probable encore que dans ces mêmes circonstances, et par suite de la production toujours simultanée des facules en abondance, la radiation ionisante du soleil est plus forte qu'en temps ordinaire.

Nichols et Hull ont essayé d'imiter la production des queues cométaires. Ils ont fait chauffer au rouge des spores du champignon Lycoperdon Bovista (ou vesse de loup) qui sont à peu près sphériques et dont le diamètre est de 0,002 mm. Ils ont obtenu ainsi des masses spongieuses de charbon d'une densité moyenne de 0,1. Ces corpuscules furent introduits en même temps qu'un peu de poudre d'émeri dans une ampoule en forme de sablier (fig. 36), dans laquelle on fit ensuite le vide, aussi parfaitement que possible. Retournant l'ampoule, on laissa tomber le mélange en filet très mince, dans la partie inférieure. Celle-ci était éclairée latéralement par un puissant arc électrique, concentré au moyen d'une lentille. On vit alors tomber verticalement les grains d'émeri, tandis que les parties charbonneuses étaient repoussées en arrière du rayon lumineux par la radiation de celui-ci.

Nous pouvons reconnaître, au voisinage immédiat du soleil, les effets de sa pression de radiation. La direction rectiligne des rayons de la couronne, s'étendant jusqu'à une distance de plus de six fois le diamètre solaire (ou environ 8 millions de kilomètres), indique l'existence de forces répulsives, qui produisent leur effet sur les fines poussières météoriques. Aussi a-t-on longtemps comparé la couronne aux queues cométaires, et Donitsch la considère comme analogue aux comètes de la seconde catégorie de Bredichine.

On peut soumettre au calcul la chaleur et le rayonnement lumineux de la masse coronaire du soleil. Sa chaleur a été déterminée par les mesures de M. Abbot. À une distance de 30 000 kilomètres de la photosphère, la couronne ne rayonne de la chaleur que dans la proportion d'un corps qui aurait la température de – 55° C. Cela vient de ce qu'elle est constituée par un brouillard ex-

cessivement léger dont la température absolue, calculée à l'aide de la loi de Stefan, serait de 4 350° C. La couronne est donc d'une ténuité telle qu'elle n'occulte qu'environ 1/190 000 du fond céleste qui se trouve derrière elle.

On arrive au même résultat si l'on étudie le rayonnement lumineux de la couronne. Il est à peu près égal à celui de la pleine lune, variant d'ailleurs environ du simple au double. Les observations ci-dessus rappelées s'appliquent aux parties les plus intenses de la couronne que l'on désigne sous le nom de couronne intérieure. D'après M. Turner son intensité diminue à mesure qu'on s'éloigne du soleil en raison inverse de la sixième puissance de la distance à son centre. À la distance d'un rayon solaire (690 000 kilomètres) la puissance lumineuse ne serait donc que de 1,6 p. 100 de celle qu'elle a dans le voisinage immédiat de la surface.

Admettons pour un instant, que la matière formant la couronne consiste en particules qui auraient juste des dimensions suffisantes pour que la force répulsive soit égale à leur poids, — toute autre particule se trouvant chassée au loin de cette couronne intérieure —, nous reconnaîtrons que le poids total de toute la couronne solaire ne dépasse pas une douzaine de millions de tonnes métriques. Ce poids serait celui de 400 de nos plus grands transatlantiques tels que l'Océanic, et ne représente que la moitié de la quantité de charbon qui se consomme dans l'industrie de notre globe, dans l'espace d'une semaine !

La ténuité extrême de la matière coronaire a déjà été déduite de ce fait que certaines comètes la traversent sans être influencées par elle dans leur mouvement, tout au moins d'une façon sensible. En 1843 une comète a passé à une distance de la surface

du soleil qui n'a pas dû être plus grande que le quart de son rayon. L'orbite de la comète n'en fut point modifiée. Moulton a calculé que la grande comète de 1881, qui s'est approchée du soleil à la distance de la moitié de son rayon, n'a pas subi une résistance qui fut plus grande qu'un cinquante millième de son propre poids. Le noyau de cette comète devrait être au moins 5 millions de fois plus dense que la matière constituant la couronne.

Newcomb a dit que la raréfaction de la matière de la couronne était sans doute telle qu'elle ne comprenait guère qu'un grain de poussière par kilomètre cube, mais cette évaluation est sans doute quelque peu exagérée.

Si petite que soit toutefois la quantité de matière répandue dans la couronne, et si insignifiante que soit la fraction qui s'en élance dans les rayons visibles ; il n'en est pas moins certain que le soleil perd, d'une façon constante, une petite quantité de matière fine, impondérable. Cette perte n'est cependant pas plus grande que la quantité de matière qui y arrive, — nous l'expliquerons plus loin —, et qu'on peut évaluer à 300 milliards de tonnes par an. On peut calculer que dans un billion d'années le soleil n'envoie ainsi vers les espaces qu'environ 1/6 000 de sa masse totale, que nous évaluons à 2×10 tonnes.

Ces chiffres sont toutefois empreints de beaucoup d'incertitude. Nous savons bien qu'il tombe sur la surface de notre globe un grand nombre de pierres météoriques, tantôt sous forme de matières compactes, tantôt à l'état de poussières fines provenant des étoiles filantes, qui s'enflamment en arrivant dans notre atmosphère, puis sont détruites. On a évalué la quantité de cette matière à environ 20 000 tonnes par an. C'est en partant de cette base que l'on arrive au chiffre de 300 milliards de tonnes, comme

évaluation de la pluie météorique qui se précipite annuellement à la surface du soleil.

Depuis des temps infinis, tous les soleils de l'univers ont jeté de la matière dans l'espace, et il semble certain que plus d'un serait aujourd'hui disparu, si, à son tour, l'espace ne leur fournissait des apports qui couvrent les pertes. Les soleils éteints ne perdent que relativement peu de matière, mais ils reçoivent autant d'apports que les soleils chauds. Comme notre propre soleil doit être rangé dans la catégorie des corps célestes plutôt froids, il n'est pas improbable que l'estimation que nous faisons de ses pertes de matière soit un peu trop élevée si nous les supposons égales à son accroissement.

Quelle est l'origine des météorites ? Si leur formation n'est pas continue, il semble que leur nombre devrait être infiniment réduit, car les divers corps célestes auraient dû, dans le cours des temps, les absorber successivement tous. Il semble plutôt très probable qu'elles résultent de l'agglomération successive des particules minimes que les soleils jettent dans l'espace par la puissance de leur rayonnement.

On trouve dans les pierres météoriques des chondres, dont la structure est très caractéristique pour ces pierres. Elle semble indiquer que leur masse résulte de l'agglomération de grains excessivement fins (fig. 37). Voici ce que dit à ce sujet Nordenskiöld : « La plupart des météorites consistent en un tissu extrêmement fin de divers alliages métalliques. La masse du fer météorique est souvent si poreuse, qu'elle s'oxyde au contact de l'air comme une éponge de fer. Le fer palladique présente,

Fig. 37. — Chondrites granuleuses dans la pierre météorique de Sexes.

Agrandissement 1:70 d'après G. Tschermak. lorsqu'on le coupe transversalement, cette propriété si désolante pour le collectionneur. Il en est de même des fers météoriques de Cranbourne, de Toluca, et d'autres encore, — à vrai dire, de presque tous les fers météoriques sans exception. Tout semble indiquer que ces masses de fer cosmique se sont constituées dans les espaces célestes ; les atomes de fer, de nickel, de phosphore, etc., se sont ajoutés à d'autres atomes, à peu près comme dans une solution métallique le courant galvanique sépare atome après atome en le précipitant. La plupart des météorites pierreuses montrent les mêmes caractères. La pierre est souvent, — sauf pour l'enveloppe extérieure —, fondue comme un laitier, si poreuse et si peu compacte, qu'elle pourrait servir de pierre filtrante, et qu'elle s'écrase aisément sous la pression des doigts. »

Quand des grains de poussière, chargés d'électricité, s'agglomèrent, leur très faible tension électrique, qui est d'environ 0,02 volt peut s'élever notablement. L'effet de la lumière ultraviolette conduit ensuite à la décharge de l'électricité de ces masses météoriques, lorsqu'elles arrivent au voisinage de quelque soleil. C'est ce que Lenard a fait justement ressortir. Leur charge négative s'échappe alors sous forme de ce que nous appelons aujourd'hui des électrons.

Le rayonnement de la couronne solaire faisant donc perdre au soleil une masse considérable de fines particules et celles-ci étant sans doute, suivant l'expérience de Wilson, chargées d'électricité négative, il doit rester dans la couche d'où émanent les rayons, une charge d'électricité positive. Par suite aussi cette charge est celle du soleil lui-même. Si elle devenait assez puissante, elle pourrait naturellement retenir les particules, chargées négative-

ment, et les empêcher d'être repoussées au loin. Tous les phénomènes électriques résultant de l'effet de la pression de radiation, cesseraient du coup. J'ai pu calculer, à l'aide de la théorie moderne des électrons, jusqu'où peut s'élever le maximum de la charge électrique du soleil sans que ces phénomènes cessent. Cette charge serait égale à 250 milliards de coulombs, charge qui n'est pas en somme très considérable, puisqu'elle suffirait seulement à provoquer la décomposition de 24 tonnes d'eau.

Mais par l'existence de cette charge positive, le soleil exerce une très grande attraction sur tous les atomes chargés négativement qui arrivent à son voisinage. Ainsi que nous l'avons dit, les corpuscules solaires agglomérés en météorites perdent leur charge, sous l'influence de la lumière ultra-violette, sous forme d'électrons négatifs, particules excessivement infimes, dont un millier pèse à peu près autant qu'un atome d'hydrogène.

Ces électrons se répandent ainsi dans l'espace. S'ils arrivent à proximité d'un corps céleste chargé positivement, ils y sont attirés avec une grande violence. Supposons que ces électrons se meuvent, comme dans l'expérience de Lenard, avec une vitesse de 300 kilomètres par seconde. Il suffirait que le soleil eut une charge égale seulement au dixième de la charge maxima déterminée ci-dessus, pour qu'il absorbât tous les électrons dont les trajectoires rectilignes (avant d'être infléchies par l'attraction solaire) seraient situées à une distance immense. Cette distance serait cent vingt-cinq fois plus grande que celle de Neptune, trois mille huit cents fois plus grande que la distance de la terre au soleil, — mais seulement 1/60 de l'éloignement de l'étoile fixe la plus proche.

On peut dire que le soleil draine en quelque sorte tout son voisinage d'électricité négative, et ce drainage lui amène, comme on le démontre aisément, une quantité d'électricité qui est en rapport direct avec la charge positive du soleil. On voit qu'il est pourvu, en somme, très complètement à l'équilibre des recettes et des dépenses électriques du soleil.

Lorsqu'une particule électrique arrive dans un champ magnétique, elle décrit une spirale autour des lignes désignées sous le nom de lignes de force. Tant qu'elle se trouve encore à une grande distance (de l'aimant) elle semble se mouvoir suivant la direction même de ces lignes de force. Or les rayons de la couronne solaire qui émanent des pôles présentent une courbure rappelant les lignes de force qui entourent un aimant. C'est ce qui a conduit à supposer que le soleil se comportait comme un immense aimant, dont les pôles magnétiques coïncideraient à peu de chose près, avec les pôles géographiques.

Les rayons de la couronne plus voisins de l'équateur présentent également ces courbures (voy. fig. 30). Mais la force répulsive de la pression de radiation est ici dirigée normalement aux lignes de force, et elle est beaucoup plus intense que la force magnétique. Il en résulte que les rayons de la couronne sont contraints de former deux puissants faisceaux dirigés équatorialement. Cela est particulièrement manifeste à l'époque des minima des taches. Pendant l'époque des maxima la force répulsive de la radiation et la vitesse initiale des poussières semblent être d'une telle intensité, que les forces magnétiques ne peuvent plus guère entrer en ligne de compte.

Les astronomes affirment que notre soleil n'est qu'un astre de faible puissance lumineuse, en comparaison avec les belles et

claires étoiles qui provoquent notre admiration. De même aussi, ce soleil est à ranger dans la catégorie des étoiles relativement froides. On peut aisément admettre que la radiation des étoiles plus grandes met en mouvement des quantités de matière beaucoup plus importantes que cela n'a lieu dans notre système solaire.

Si donc les diverses étoiles de l'univers s'étaient trouvées composées d'éléments chimiques dissemblables, cette variété aurait disparu au cours des siècles. Les météorites peuvent en effet être considérées comme une collection d'échantillons de la matière provenant de tous les points les plus éloignés de l'univers.

Quels sont donc les corps dont l'existence nous est ainsi révélée ?

Nous avons vu (p. 113–114) que dans la matière cométaire les corps les plus importants sont le fer, le sodium, le carbone, l'hydrogène et l'azote (sous forme de cyanogène). Mais nous savons aussi, surtout par les études de Schiaparelli, que les météorites ne sont souvent que des fragments de comètes, et qu'il y a conséquemment entre elles une véritable parenté. C'est ainsi, rappelons-le, que la comète de Biela, dont la révolution se faisait dans une période de 6,6 années, avait disparu depuis 1852. Elle s'était, déjà précédemment, en 1845, partagée en deux masses distinctes. Elle a été, depuis, reconnue dans un essaim d'étoiles filantes, dont la période est d'une durée identique, et qui passe près de l'orbite de la terre vers le 27 novembre. On a reconnu qu'un certain nombre d'autres essaims météoriques présentent des particularités analogues.

Or nous savons que les corps simples, que nous avons énumérés ci-dessus, et qui ont été décelés par l'analyse spectrale dans les comètes, sont précisément ceux que l'on rencontre en plus grande abondance dans les pierres météoriques. Ils contiennent encore d'autres éléments, du calcium, du magnésium, de l'aluminium, du nickel, du cobalt, du chrome. On y trouve des métalloïdes ; l'oxygène, le silicium, le soufre, le phosphore, le chlore, l'arsenic, l'argon et l'hélium y ont été constatés. Leur composition rappelle vivement celle des produits volcaniques que nous appelons basiques, c'est-à-dire qui contiennent de grandes quantités d'oxydes métalliques, et que des bonnes raisons nous font considérer comme provenant de couches très profondes de notre globe. Lockyer a rendu incandescents des météorites en les plongeant dans l'arc électrique. Leur spectre s'est alors trouvé extrêmement voisin de celui que donne directement le soleil.

De tous ces faits nous concluons que ces messagers, venus d'autres systèmes solaires que le nôtre, qui nous apportent des échantillons de leurs matières constitutives, ont une très grande ressemblance à la fois avec la matière de notre soleil, et avec celle de l'intérieur de notre globe. Que d'autres étoiles, ainsi que les comètes, eussent, dans leurs parties essentielles, une constitution analogue à celle de notre soleil et de notre terre, cela a été prouvé depuis longtemps par l'analyse spectrale. Mais certains corps n'ont jamais pu être reconnus par ce moyen ni dans le soleil, ni dans les étoiles. Tels sont le chlore, le brome, le soufre, le phosphore et l'arsenic, qui jouent cependant un rôle des plus importants dans la constitution de la terre. Or on en retrouve dans les météorites, et il ne subsiste plus le moindre doute qu'ils fassent partie également du soleil et des autres globes célestes. Seulement ces métalloïdes ne produisent que difficilement des

spectres, et c'est là la seule raison pour laquelle on n'a pas encore pu prouver leur existence, dans les étoiles, par l'analyse spectrale.

En ce qui concerne les gaz récemment découverts, l'hélium, l'argon, le néon, le crypton et le xénon, on en a constaté la présence dans le chromosphère, par les moyens de leurs spectres, pendant diverses éclipses de soleil (Stassano). Toutefois, suivant l'opinion de Mitchell, les affirmations concernant le krypton et le xénon ne seraient pas encore absolument établies.

Les grains minuscules de poussière qui sont chassés par la pression de radiation dans l'espace immense, vers les soleils et les étoiles situés à des distances les plus variées, peuvent se rencontrer et s'aggréger en masses plus ou moins grandes, pour former de la poussière météorique ou des pierres météoritiques. Ces aggrégations tombent en partie sur d'autres mondes, sur les étoiles, les planètes, les comètes ou sur des satellites. En partie, — sans doute en majeure partie même —, elles flottent dans l'espace. Elles y forment une sorte de brume, qui, comme d'autres plus grands corps célestes obscurs, nous retire quelque peu de la lumière envoyée à notre globe par les soleils éloignés. Si l'espace céleste est rempli de fines poussières, celles-ci doivent laisser passer, tout comme celles de notre atmosphère lors du coucher du soleil, de la lumière rouge, de préférence à la lumière bleue. De même que le soleil paraît plus rouge lorsqu'il approche de l'horizon, c'est-à-dire quand ses rayons sont obligés de traverser une plus grande épaisseur d'air chargé de poussières, que lorsqu'il est haut dans le ciel, la lumière des étoiles éloignées devrait être en général plus rouge que celle des astres plus rapprochés. M. Tikhoff, un astronome russe a vérifié cette conclusion. Se ser-

vant de verres de diverses couleurs, qu'il a interposées devant la plaque photographique, il a pu évaluer les intensités des différentes couleurs dans la lumière stellaire.

Cette lumière se trouvant en partie éteinte dans le trajet qu'elle parcourt avant de nous arriver, nous ne voyons pas la totalité de la voûte céleste couverte d'étoiles lumineuses. Tel serait sans doute le cas si, comme il est probable, les étoiles sont uniformément réparties dans l'espace infini de l'univers, et si aucun obstacle ne nous privait de leur lumière.

Mais s'il n'existait pas tout une autre catégorie de corps célestes, de température très basse et de volume considérable, qui absorbent et retiennent la chaleur rayonnée par les soleils lumineux, il arriverait rapidement que les corps obscurs, les météorites, ainsi que la poussière cosmique obscure seraient chauffés par la radiation des soleils et qu'ils deviendraient lumineux à leur tour. La sphère céleste tout entière nous apparaîtrait alors comme une voûte entièrement de feu, dont le rayonnement calorifique anéantirait rapidement tout ce qui a vie sur la terre.

Ces corps célestes froids, qui absorbent les rayons des soleils, sans que leur température s'élève, ce sont les nébuleuses proprement dites, ou les étoiles nébuleuses. Des études récentes ont fait reconnaître que ces remarquables corps célestes existent partout, répandus sur la voûte céleste (comp. p. 49). Nous expliquerons plus loin (dans le chap. VII) le mécanisme étonnant, merveilleux, qui fait qu'elles puissent recevoir de la chaleur, sans cependant s'échauffer. Mais comme ces nébuleuses froides occupent la majeure partie de l'espace céleste, la plus grande partie de la poussière cosmique, dans son voyage à travers l'immensité, doit finir par s'y précipiter. Elle y rencontre des masses gazeuses qui l'em-

pêchent de pénétrer, et qui l'arrêtent. Comme la poussière est chargée d'électricité, principalement négative, celle-ci s'amasse également à la périphérie de la nébuleuse. Ce phénomène dure jusqu'à ce que la tension électrique devienne suffisante pour qu'il y ait émission d'électrons, et un commencement de décharge.

Il en résulte comme conséquence, que les gaz périphériques arrivent à l'incandescence, malgré que leur température ne dépasse sans doute que de très peu, 50 degrés peut-être, le zéro absolu, ou –273° C. Nous arrivons, par cette luminosité, à constater leur existence. Comme la majeure partie des particules de poussière est arrêtée avant d'avoir pénétré un peu profondément à l'intérieur des nébuleuses, ce sont en somme lus parties extérieures des nébuleuses ou brouillards cosmiques qui nous envoient leur lumière. Cela concorde absolument avec la description que fait Herschel des nébuleuses planétaires, qui ne présentent à leur centre aucun renforcement de lumière, mais qui brillent, dit-il, comme si elles formaient « une enveloppe sphérique creuse », de matière nébuleuse.

Or, il est aisé de démontrer que ce sont seulement les éléments les moins facilement condensables, tels que l'hélium et l'hydrogène, qui puissent exister à l'état gazeux à une température aussi basse. C'est pourquoi les nébuleuses ne brillent presque exclusivement que par des rayons de ces gaz. On y trouve cependant encore une autre matière, encore mystérieuse, qu'on a appelé le « nébulium », dont la lumière très particulière n'a encore été observée nulle part ailleurs, ni sur la terre, ni dans celle d'aucun corps céleste. Jadis on expliquait ce fait en disant que les nébuleuses ne contenaient aucun autre corps que ceux énumérés plus haut, ou encore que tous les autres éléments s'y

trouvent décomposés en hydrogène. L'hélium était encore inconnu à ce moment. Mais une explication bien simple est celle-ci : que les seuls gaz des couches extérieures arrivent à l'incandescence. Quant à ce qui se trouve dans leurs parties profondes, nous l'ignorons absolument.

Cette explication a rencontré deux objections. Elle aurait, dit-on, pour conséquence que la totalité de la voûte céleste devrait briller d'une lueur de nébuleuse. D'autre part, notre atmosphère terrestre même devrait nous la manifester. Mais, en ce qui concerne celle-ci, l'hydrogène et l'hélium ne s'y trouvent qu'en quantités infimes. Par contre elle donne au spectroscope une autre lumière, qu'on a appelé la lumière aurorale (Nordlichtlinie) qui est probablement causée par du krypton. Où que l'on dirige le tube du spectroscope par une nuit très claire, et particulièrement sous les tropiques, on en remarque la ligne verte très particulière. On la croyait spéciale à la lumière zodiacale, mais des investigations très serrées ont fait reconnaître qu'on la trouve sur tous les points de la voûte céleste, en l'absence de toute lumière zodiacale. L'objection précitée est donc ainsi détruite, car l'observation approfondie nous apprend que notre déduction est absolument d'accord avec l'expérience.

En ce qui concerne la première des deux objections il faut remarquer que si nos sens perçoivent une lumière, c'est que son intensité dépasse une certaine valeur minima. Mais il peut exister des nébuleuses, — et c'est probablement la majorité d'entre elles —, que nous ne saurions apercevoir parce que le nombre des atomes de poussière chargées d'électricité qui y parviennent, est beaucoup trop insignifiant. Ce point de vue a trouvé sa confirmation dans la subite manifestation de l'étoile nouvelle de Persée, le

21–22 février 1901. Deux sortes de particules poussiéreuses furent chassées de cette étoile, dont l'une se déplaçait avec une vitesse sensiblement double de l'autre. Ces masses poussiéreuses formèrent deux enveloppes sphériques autour de l'étoile nouvelle. Elles correspondaient, sous tous les rapports, à deux catégories de queues que l'on peut observer parfois à une même comète (voy. fig. 35). Ce sont les queues des première et deuxième catégorie de Bredichine. Lorsque ces poussières rencontrèrent les masses nébuleuses qui se trouvaient sur leur passage, celles-ci devinrent lumineuses, et nous eûmes ainsi connaissance de grands amas nébuleux, de l'existence desquels nous n'avions auparavant pas le moindre soupçon.

Il en est sans nul doute de même dans d'autres régions du ciel, où jusqu'à présent, nous n'avons pu reconnaître aucune nébuleuse. Il nous paraît que la cause doit en être cherchée dans le trop petit nombre des particules chargées d'électricité qui circulent dans ces régions. Une raison analogue explique sans doute aussi la variabilité de quelques nébuleuses qui, jusqu'à présent, a semblé particulièrement énigmatique.

05

Nous avons étudié dans le chapitre précédent les effets produits sur les corps célestes éloignés, par les particules de matière que lancent dans l'espace le soleil et les étoiles. Il y a intérêt à savoir si ces poussières ont aussi quelque effet sur notre globe. Nous avons déjà fait remarquer que la lueur très particulière que l'on observe sur tous les points de la voûte céleste dans des nuits

claires, était produite par les décharges électriques de la poussière cosmique qui nous arrive. Ceci conduit à nous demander si les aurores boréales, que la science moderne considère comme le résultat de décharges électriques dans les régions supérieures de l'atmosphère, ne sont pas causées de même par la chute de poussières solaires. Et de fait, on verra que nous pourrons, de cette sorte, expliquer toute une série de singularités de ces phénomènes mystérieux, qui de tout temps ont excité l'imagination.

Il est acquis maintenant, que les météores et les étoiles filantes qui pénètrent dans l'atmosphère, y deviennent incandescents par leur frottement dans l'air à une hauteur moyenne de 120 kilomètres, et parfois déjà à 150 ou 200 kilomètres. Dans un cas isolé on a cru observer que la hauteur était beaucoup plus grande encore. L'atmosphère s'étend donc jusqu'à ces très grandes hauteurs, et elle n'est pas limitée, comme on le croyait jadis, à un maximum de 100 kilomètres.

Il en résulte que des particules beaucoup plus fines que les météores, comme la poussière solaire, peuvent être retenues à des hauteurs encore plus grandes, sans jamais y atteindre la température de l'incandescence, par suite de leur ténuité et du refroidissement par rayonnement ou par conductibilité qui en est la conséquence. Nous attribuerons au point d'arrêt de ces poussières une hauteur moyenne de 400 kilomètres.

Les flots poussiéreux, qui sont repoussés dans l'espace par le soleil, sont tantôt électriquement neutres, tantôt chargés d'électricité positive ou négative. Ces derniers seuls peuvent avoir quelque rapport avec les aurores boréales. Les autres, arrivés au contact de l'atmosphère, tombent lentement à la surface du sol. Ils constituent ce qu'on appelle la poussière cosmique, dont la

grande importance a été signalée par Nordenskiöld. Il estimait que l'accroissement annuel de la terre par cette cause atteignait au moins 10 millions de tonnes, soit cinq cents fois plus que le chiffre que nous avons indiqué plus haut (voy. p. 118). Il supposait, d'après cela, — et cette opinion a été partagée par Lockyer et plus récemment par Chamberlin —, que les planètes se forment et s'accroissent principalement de météorites.

Mais la poussière qui, du soleil, parvient à la terre, ne dépasserait pas beaucoup 200 tonnes par an, si elle n'était pas chargée d'électricité. Lors même que ce chiffre serait beaucoup plus faible que la réalité, la quantité en serait toujours très minime, en comparaison des 20 000 tonnes de météores ou d'étoiles filantes qui annuellement tombent sur la terre. Malgré cela l'importance de cette chute de poussières est très grande, par suite de son état de division extrême. Il est probable qu'elles sont en proportion beaucoup plus abondante dans les régions supérieures de l'atmosphère que celles abandonnées par les météores, bolides ou autres.

Si cette poussière, malgré sa masse totale très insignifiante, a néanmoins une grande importance pour les phénomènes terrestres, cela tient à sa finesse extrême, qui lui permet de rester, comme la poussière du Krakatoa, très longtemps en suspension dans l'atmosphère, plus d'un an peut être. Cela tient encore, peut être surtout, à l'électricité dont elle arrive chargée.

Pour comprendre les effets produits par cette poussière sur notre globe, il faut nous rendre compte comment les conditions d'existence de la terre dépendent de ses rapports avec les diverses parties actives du soleil. Il faut encore savoir comment l'émission de ces poussières est une conséquence de l'activité va-

riable du soleil. Cela ne peut se faire qu'à l'aide de données statistiques très étendues.

De longues séries d'observations sont nécessaires pour se faire une idée de l'effet produit par ces poussières.

Ces particules très ténues emportent, lorsqu'elles sont repoussées au loin par le soleil, les gaz qu'elles ont pu condenser à leur surface, et qui faisaient primitivement partie de la chromosphère ou de la couronne solaire. Parmi eux, l'hydrogène est le plus important, après lui l'hélium et les autres gaz nobles dont Ramsay a démontré l'existence dans l'atmosphère terrestre. Ces gaz ne s'y trouvent qu'en quantités fort minimes. L'hydrogène ne s'y trouverait même pas normalement à l'état libre, suivant Liveing et (après lui) suivant Mitchell. On en trouve parfois, il est vrai, dans les produits gazeux des volcans, par exemple dans ceux du Kilauea, dans l'île Hawaï, mais il s'enflamme immédiatement en arrivant au contact de l'air. S'il existait à l'état libre dans notre atmosphère, il se combinerait petit à petit avec l'oxygène pour former de l'eau, et l'on est conduit à admettre qu'il nous arrive en petites quantités d'une autre source, qui ne peut être que le soleil. Mitchell considère ce fait comme un puissant argument en faveur de l'arrivée des poussières solaires dans noire océan atmosphérique.

Cette poussière solaire qui tombe sur notre globe doit naturellement varier avec l'activité éruptive du soleil. Chez nous, la quantité qu'on en trouve répandue dans les couches supérieures de l'atmosphère influence la couleur de la lumière que nous envoie en même temps le soleil. Après l'éruption du Rakata (Krakatoa) en 1883, et aussi, à un degré moindre après l'éruption de la

Montagne Pelée, à la Martinique, tout le monde a pu observer ce qu'on a appelé plus spécialement les « lueurs rouges ».

On a remarqué en même temps un autre phénomène, qui, lui, a pu être soumis à des mesures.

On sait que la lumière du ciel est partout polarisée, sauf en un très petit nombre d'endroits. Parmi ces endroits il en est un que l'on désigne sous le nom de point d'Arago, qui est situé un peu au-dessus du point directement opposé au soleil. Un autre, appelé le point de Babinet, se trouve un peu au-dessus du soleil lui-même. Si l'on détermine la hauteur de ces deux points au moment du coucher du soleil, on trouve, tout à fait en accord avec les prévisions de la théorie, que cette hauteur est plus grande lorsque l'atmosphère est chargée de poussières que lorsque les conditions sont normales. Un savant allemand, M. Busch, a déterminé les hauteurs moyennes de ces points au moment indiqué ci-dessus. Il les a mis en regard avec le nombre annuel des taches, et il a pu établir le curieux tableau suivant, où les dites hauteurs sont indiquées en degrés au dessus de l'horizon :

Il y a, dans la suite de ces chiffres, une marche régulière bien accusée. La période du maximum des taches solaires correspond exactement au maximum de l'altitude des points dits neutres. La même concordance existe pour les minima. Il semble seulement que les phénomènes dépendant de l'atmosphère marquent un léger retard sur les phénomènes correspondants du soleil.

Lorsque l'air est chargé de poussières, et qu'en même temps une forte ionisation a été produite par l'influence de rayons cathodiques, les circonstances sont favorables à la formation des nuages. C'est un effet facilement observable au moment de la

production des aurores boréales. Celles-ci sont si régulièrement suivies par des nuages abondants, de forme caractéristique, qu'Adam Paulsen a réussi, à l'aide de ces nuages, à observer des aurores en plein jour.

Une autre concordance a été notée entre l'abondance de ces nuages, — des cirrus, — et les taches solaires. Klein les a observées avec suite à Cologne, et il a publié le résultat de ses observations de 1850 à 1900. Il a montré ainsi que pendant cette période, qui comprend plus de quatre périodes de onze ans des taches solaires, leurs maxima correspondent précisément aux années où l'on a observé le plus de cirrus. Les minima présentent, ici encore, la même concordance.

Il semble qu'une formation plus abondante de nuages se produise également sur la planète Jupiter, au moment où le soleil présente la plus grande abondance de taches. Vogel a remarqué qu'à ces moments-là, Jupiter brille d'une lumière beaucoup plus blanche que lors des minima des taches, où il paraît rouge. Plus on réussit à plonger le regard dans la profondeur de l'atmosphère de cette planète, plus elle semble rouge. Lorsque l'activité du soleil est grande, les parties supérieures de l'atmosphère de Jupiter se remplissent de nuages.

La poussière solaire a également une certaine influence sur les comètes. M. Backlund (directeur de l'observatoire de Poulkovo, près de Saint-Pétersbourg) a fait de notables études sur certaines particularités du mouvement de la comète d'Encke. En soumettant au calcul les résultats très considérables de l'observation de cette comète, il a reconnu qu'elle avait dû éprouver une résistance très marquée à son mouvement, à des époques où les taches solaires étaient les plus abondantes. Cette résistance

semble indiquer la présence de poussières dans l'espace parcouru par elle. Par la suite, cette résistance a varié avec l'abondance des taches. M. Berberich a constaté que les queues des comètes sont plus brillantes dans les années où on voit beaucoup de taches, que dans les années de minima. Il en résulte comme conséquence, que l'on découvre plus de comètes dans les années de maxima que dans les années moyennes. Cette particularité s'explique aisément par la luminosité plus grande que prennent les chevelures quand elles sont frappées par les poussières solaires chargées d'électricité.

C'est l'arrivée dans notre atmosphère de la poussière solaire chargée d'électricité qui est cause de la production des aurores boréales et australes.

Ces aurores se produisent, comme leur nom l'indique, principalement dans les régions qui environnent les pôles de notre globe. Elles n'ont cependant pas leur fréquence la plus grande dans le voisinage immédiat des pôles géographiques. Le maximum se produit dans les cercles qui comprennent les pôles magnétiques et géographiques. Le cercle qui, au Nord, correspond à leurs maxima passe par le cap Tcheljuskine, au nord de la Nouvelle-Zemble, par la côte nord-ouest de la Norvège, puis à quelques degrés au sud de l'Islande et du Groenland, traverse la baie d'Hudson et passe enfin à la pointe nord-ouest de l'Alaska. À partir de ce cercle, les aurores se manifestent beaucoup moins à mesure qu'on marche vers le Sud. On en observe à Stockholm cinq fois moins qu'en Laponie, et à Paris, trente fois moins.

Paulsen partage les aurores boréales en deux catégories, fort différentes les unes des autres. Si jusqu'à présent on a éprouvé tant de difficultés à résoudre les problèmes connexes à ces appa-

ritions, c'est que, semble-t-il, on a eu le tort de vouloir
Fig. 38. — Aurores en forme d'arc, observées par Nordenskiöld, pendant l'hivernage de la Vega, près du détroit de Behring. 1879.
appliquer à toutes les aurores le même raisonnement et la même critique. Les aurores de la première catégorie n'ont point de rayons. Elles occupent dans le ciel un vaste espace horizontal. Elles sont tranquilles, et leur lumière est étonnamment calme. Elles montent lentement vers le zénith, et aucune perturbation magnétique ne les accompagne. Ces aurores ont en général la forme d'un arc, dont le sommet se trouve dans la direction du méridien magnétique (voy. fig. 38). Il arrive assez fréquemment qu'il y ait plusieurs arcs superposés concentriquement.

Ce genre d'aurores fut observé par Nordenskiöld, très régulièrement, pendant la durée de la nuit polaire, lorsqu'il hiverna dans le voisinage du détroit de Behring, près de Pitlekaj. Adam Paulsen les a très souvent vues en Islande et au Groenland, dans des localités situées en dedans du cercle des maxima qui a été défini plus haut, où les aurores boréales sont d'une grande
Fig. 39. — Aurore de forme rayonnante. fréquence. Il arrive qu'on en voit également au sud de ces régions, où elles prennent la forme de grands arcs d'un blanc laiteux qui montent très haut dans le ciel.

Dans les régions arctiques on observe souvent que de grandes étendues de ciel présentent une lumière diffuse, que l'on pourrait le mieux comparer à une nuée lumineuse, dans laquelle seraient répandues des parties plus sombres, mais dont l'obscurité n'est peut-être qu'un effet de contraste. Cette forme de l'apparition a été plusieurs fois remarquée par les membres de l'expédition suédoise, au cap Thordsen, en 1882–1883.

On a fréquemment observé, principalement dans les régions arctiques, des étendues lumineuses qui avaient si peu d'élévation qu'elles cachaient des collines situées un peu plus loin. Ainsi, par exemple, Lemström a vu au Spitzberg une aurore formant nappe, qui se trouvait entre lui et une paroi de montagne, dont la hauteur ne dépassait pas 300 mètres. Dans le nord de la Finlande il a observé une ligne d'aurore devant un drap noir placé à quelques mètres seulement de distance. Ces phénomènes sont rangés également par Adam Paulsen parmi les aurores boréales de la première catégorie ; il les considère

Fig. 40. — Aurore boréale, observée par Gyllenskiöld, au Spitzberg. 1883.

comme des nuages phosphorescents, que des courants atmosphériques ont fait descendre exceptionnellement bas, près du sol.

Les aurores de la seconde catégorie sont celles qui montrent les rayons si caractéristiques du phénomène généralement connu sous ce nom. Ces rayons sont parfois tout à fait distincts (fig. 39), mais en général ils se fondent les uns dans les autres, principalement vers le bas, ressemblant alors à des draperies flottant au vent (voy. fig. 41). Ces rayons ont à très peu près la direction de l'aiguille de la boussole d'inclinaison. Quand ils se développent beaucoup, de façon à occuper toute la voûte céleste, leur point de convergence est très nettement reconnaissable comme le point central d'une « couronne » (fig. 40). Quand une aurore atteint son maximum d'intensité elle semble parcourue par de nombreuses vagues lumineuses.

Les draperies semblent très minces ; Paulsen remarqua parfois au Groenland, qu'elles semblaient passer au-dessus de sa

tête. Elles se présentaient alors en raccourci, par la tranche, et elles avaient la forme de lignes ou de bandes lumineuses.

Cette catégorie d'aurores influence l'aiguille aimantée. Quand elles franchissent le zénith, cette influence change de sens : la déclinaison passe de l'Est à l'Ouest, quand la bande va du Nord au Sud. Paulsen en conclut que les rayons contiennent de l'électricité négative (rayons cathodiques), cheminant du haut vers le bas. Ce type d'aurores correspond donc à de violents mouvements d'électricité négative, tandis que celles de la première catégorie semblent provenir d'une matière phosphorescente qui n'est pas animée de mouvements de quelque importance. Les rayons peuvent descendre jusque dans des couches atmosphériques très voisines du sol, tout au moins dans les contrées limitrophes du cercle des maxima. Nous citerons encore à ce sujet l'observation de Parry, qui, à Port Bowen (N-O de la terre de Baffin), a vu un rayon d'aurore boréale qui se produisait devant une côte dont la hauteur fut trouvée de 214 mètres.

Les aurores de la première catégorie peuvent passer dans la seconde, et réciproquement. L'arc calme de l'aurore émet parfois subitement des rayons, qui se dirigent vers le sol. Si l'aurore est forte, ces rayons s'élancent quelquefois aussi vers le haut. Par contre la violente agitation d'une aurore à draperies peut se calmer et faire place à une lumière paisible et diffuse qui couvre le ciel.

Les aurores calmes se voient surtout dans les régions arctiques. Plus loin du pôle elles ne se manifestent que par une lumière diffuse, qui semble répartie uniformément sur le firmament et qui donne la ligne blanchâtre dont nous avons déjà parlé.

Les aurores les plus fréquemment observées, même ailleurs que par les membres des expéditions arctiques, appartiennent à la seconde catégorie. Toutes celles sur laquelle nous donnerons plus loin quelques statistiques sont des aurores rayonnantes, à l'exception de celles d'Islande et du Groenland. Ces aurores rayonnantes suivent d'une façon très marquée la

Fig. 41. — Draperies d'une aurore boréale, vue dans le Finmarken (Norvège septentrionale).

période de 11,1 années des taches solaires. Elles deviennent bien plus fréquentes dans les années de taches abondantes, mais tel ne serait pas, d'après Tromholt, le cas pour celles d'Islande et du Groenland. Celles-là semblent être à peu près indépendantes de la fréquence des taches. Souvent les maxima des aurores correspondants aux maxima des taches sont dédoublés par un minimum secondaire.

Cette remarque s'applique le plus nettement aux contrées polaires, mais elle résulte également des statistiques scandinaves et d'autres pays.

Cherchons maintenant à comprendre très exactement quelle est la nature d'une aurore boréale. Pour cela nous allons étudier la couronne solaire d'une année de minima de taches, par exemple l'année 1900 (voy. fig. 30). Les rayons de cette couronne qui émanent du voisinage des pôles du soleil s'infléchissent latéralement sous l'influence des lignes de force magnétiques. Les particules très petites, chargées d'électricité négative, n'ont évidemment qu'une vitesse très faible, en sorte que leur trajectoire reste très voisine de ces lignes de force, et qu'elles finissent par se rassembler plus bas, dans le voisinage de l'équateur. Là, les lignes de force sont moins abondantes, par quoi nous voulons dire que les forces magnétiques sont elles-mêmes plus faibles. La

poussière solaire peut donc être chassée par la force répulsive de façon à former un grand disque, contigu au plan équatorial du soleil. Ce disque nous apparaît, vu de la terre, sous forme de deux grands faisceaux de rayons qui s'allongent dans la direction de l'équateur solaire.

Ainsi chassée, une partie de cette poussière solaire arrive au voisinage de la terre. Elle y subit naturellement l'influence des lignes de force magnétiques de notre globe. Il en résulte qu'il se forme deux faisceaux qui se dirigeront vers les deux pôles magnétiques du globe. Ces pôles ne se trouvent pas à la surface, mais à une certaine profondeur, c'est pourquoi les rayons ne se dirigent pas tous vers le pôle magnétique superficiel. Il faut s'attendre à ce que les particules chargées négativement qui nous viennent du soleil se dirigent principalement vers une région située un peu au sud du pôle magnétique nord, lorsqu'il est midi pour celui-ci. Quand au contraire il est minuit au pôle magnétique nord, la plupart des particules chargées sont saisies par les lignes de force avant qu'elles ne passent le pôle Nord. C'est pourquoi le cercle des maxima des aurores entoure à la fois le pôle géographique de la terre et le pôle magnétique (voy. p. 134). La poussière chargée négativement se concentrera donc dans deux anneaux, au dessus des cercles des maxima. Elle causera une lueur phosphorescente quand elle rencontrera des molécules d'air, absolument comme si celles ci étaient frappées par les atomes électrisés du radium. Cette lueur phosphorescente se manifeste sous forme d'un arc lumineux dont la hauteur au-dessus de la surface terrestre est d'environ 400 kilomètres, comme l'ont indiqué les mesures de Paulsen. Le point culminant de cet arc semble toujours se trouver là où le cercle des maxima est le plus

rapproché du lieu d'observation. Cette direction concorde, à fort peu de chose près, avec la direction de l'aiguille aimantée.

Le physicien norvégien Birkeland a fait un grand nombre d'expériences sur l'effet que produisent les rayons cathodiques sur une sphère en fer aimantée, qui pouvait représenter la terre. Ces rayons sont considérés comme formés de particules chargées négativement, animées d'une vitesse énorme. La sphère était recouverte d'un enduit phosphorescent, et dans son voisinage se trouvaient disposés des écrans également enduits de la même matière. Il devint ainsi possible de suivre exactement les trajets des rayons cathodiques qui impressionnaient la matière phosphorescente, et l'on obtint une reproduction très approchée du phénomène des aurores. M. Störmer, un autre savant norvégien a pu ensuite soumettre au calcul le trajet des molécules de cette sorte.

La couronne solaire se manifeste et se comporte tout autrement dans les années de maxima (voy. fig. 31). Les rayons se dirigent un peu dans tous les sens, suivant des lignes droites. Si quelques régions semblent particulièrement bien fournies, ce sont celles qui correspondent aux zones contenant les taches. La vitesse dont est animée alors la poussière solaire est évidemment beaucoup trop grande pour qu'elle puisse être influencée et déviée par les lignes de force magnétique. Par suite cette même poussière chargée ne sera pas très sensiblement influencée par les lignes magnétiques de la terre. Elle tombera surtout là où elle nous arrivera la plus dense. Ces rayons solaires « durs » paraissent être émis par les facules, et comme ces facules existent en plus grande abondance dans les années où il y a beaucoup de taches, de même on voit beaucoup d'aurores boréales dans des

régions fort éloignées des cercles de maxima, notamment lorsque les taches sont nombreuses.

L'inverse se produit pour les rayons de poussière solaire que nous appelons « tendres », qui arrivent toujours dans le cercle des maxima des aurores. Ces rayons se manifestent le plus souvent quand il y a un minimum de taches, comme le font voir les observations de la couronne. (Il est possible qu'ils soient entraînés par les rayons « durs » dans les années de maxima.) En conséquence on verra le plus d'aurores boréales de la sorte correspondante, dans les années de minima. Les deux sortes de rayons « durs » et « tendres » sont certainement émis simultanément, mais les premiers sont prédominants dans les années de maxima, les autres dans les années de minima.

On sait depuis longtemps que dans des régions autres que polaires, la périodicité des aurores boréales suit très exactement celle des taches solaires. La preuve en a été faite par M. Fritz depuis 1863. La période est assez variable, — de 7 à 16 ans —, mais en moyenne elle est de 11,1 années. Nous résumons, dans l'énumération ci contre, les millésimes des

maxima et minima des unes et des autres.

On a reconnu qu'il existe encore d'autres périodes ou fluctuations plus longues, comme l'a déjà prouvé de Mairan dans son ouvrage classique de 1746, et qui se rapportent aussi bien à la fréquence des taches qu'à celle des aurores. D'après Hansky il existerait une période de 72 ans ; d'après Schuster, il y en aurait une de 33 ans. On a constaté des maxima extrêmement marqués au commencement et à la fin du xviii siècle ; le dernier fut celui de 1788, après quoi pendant toute la période de 1800 à 1830 les

aurores boréales devinrent fort rares. Il en fut de même pendant une série d'années au milieu du xviii siècle. Les années 1850 et particulièrement 1871 donnèrent des maxima très importants ; depuis lors nous sommes de nouveau dans une période de calme.

On trouve, dans la littérature qui concerne notre sujet, des indications fort diverses concernant la hauteur à laquelle se produisent les aurores. D'une façon générale cette hauteur semble être d'autant plus grande que le lieu de l'observation est plus voisin de l'équateur. Cela concorde très bien avec la faible déviation des rayons cathodiques vers la surface du globe, dans les contrées éloignées du pôle. On a cherché à mesurer ces hauteurs, et Gyllenskiöld a trouvé, au Spitzberg, une hauteur moyenne de 55 kilomètres. Dans le Nord de la Norvège, Bravais a trouvé de 100 à 200 kilomètres. Dans le centre de l'Europe, de Mairan l'a évaluée à 900 kilomètres mais Galle, par contre, à 300 kilomètres. Au Groenland, Paulsen a observé des aurores de très faible hauteur. En Islande, il trouva pour hauteur du point culminant des aurores en arc, 400 kilomètres. Or, ce point peut être considéré comme l'origine de l'aurore.

Ces hauteurs, dont les plus anciennes mesures n'offrent pas une certitude très absolue, correspondent assez bien à l'ordre de grandeur que l'on attribuerait à la distance où la poussière solaire entrerait en contact avec notre atmosphère.

Il existe encore, pour les aurores, une périodicité annuelle, que l'on explique très aisément à l'aide de la théorie de la poussière solaire. Ainsi que nous l'avons dit, les taches ne se produisent que très rarement dans le voisinage immédiat de l'équateur du soleil. La même chose est vraie pour les facules. Dans des

latitudes un peu plus élevées, elles augmentent rapidement, et leur plus grand nombre se trouve vers le 15 degré de latitude.

Le plan de l'équateur solaire est incliné d'environ 7 degrés sur le plan de l'écliptique. La terre se trouvera donc dans le plan de cet équateur le 6 décembre et le 4 juin de chaque année, et sa plus grande élongation a lieu trois mois plus tard. On peut donc s'attendre à un minimum de chute de cette poussière solaire, quand en décembre et juin, la terre rencontre le plan équatorial. Les maxima correspondraient par contre aux mois de mars et de septembre. L'observation de ces faits est un peu gênée par le crépuscule qui, par les nuits claires de l'été, empêche l'observation des aurores dans les régions polaires. Les nuits sombres de l'hiver favorisent au contraire leur observation. Il a cependant été possible d'établir pour un certain nombre de pays un résumé qui fait voir la répartition des aurores sur les différents mois de l'année. J'ai établi ce tableau avec le concours de M. Ekholm.

Il y a des contrées où la différence entre la durée du jour et de la nuit n'est pas très grande aux diverses époques de l'année. Tel est le cas aux États-Unis et dans des contrées situées vers le 40 degré de latitude Sud où l'on peut observer des aurores australes. On trouve alors que le minimum principal a lieu en hiver. Dans l'hémisphère Nord il se produit en décembre, dans l'hémisphère Sud, en juin ou en juillet. Un minimum moins marqué se présente en été.

Parmi les époques où la terre passe dans le plan équatorial du soleil et où il arrive sur notre globe un minimum de poussières, celles-là se distinguent par des apparitions de l'aurore plus fréquentes, qui correspondent à l'altitude la plus grande du soleil. C'est à quoi il faut s'attendre, car la plus grande partie des pous-

sières solaires tombe sur les parties du globe où le soleil, passant au méridien, a la plus grande altitude. Les deux maxima de mars et avril, de septembre et octobre, qui correspondent à l'éloignement le plus grand de la terre du plan équatorial du soleil sont très nettement marqués dans toutes les statistiques, sauf en Islande et au Groenland. Ici, la fréquence visible des aurores dépend uniquement de l'intensité de la lumière crépusculaire. Il n'existe en conséquence qu'un maximum, celui de décembre ; le minimum correspondant a lieu en juin. Il convient de remarquer toutefois qu'une statistique d'observations plus récentes (1891–1903) donne un minimum en décembre. C'est par la même raison que le minimum d'été est très faible dans les pays situés sous les latitudes élevées, comme la Suède et la Norvège.

Une raison tout analogue rend très difficile de déterminer la période journalière des aurores. La plus grande proportion des poussières solaires tombe aux environs de midi, et le plus grand nombre d'aurores devrait faire son apparition un peu après midi, tout comme la chaleur diurne se fait sentir un peu après le passage du soleil au méridien. Par suite du fort éclairage par le soleil, il est évident que ce maximum ne peut s'observer que dans la nuit arctique des régions polaires, et encore, à condition d'y faire une correction de l'influence troublante de la lumière crépusculaire. C'est en opérant ainsi que Gyllenskiöld a trouvé au cap Thordsen, au Spitzberg, un maximum à 2 heures 40 minutes. Le minimum correspondant avait lieu à 7 heures 40 minutes du matin. En d'autres endroits on arrive seulement à constater que les aurores sont plus vives et plus fréquentes avant minuit, plutôt qu'après. Dans l'Europe centrale le maximum se produit vers 9 heures du soir, en Suède et Norvège (sous 60 degrés de latitude) une demi-heure à une heure plus tard.

On a constaté encore, pour les aurores, quelques autres périodes, à peu près mensuelles. L'une de 25,93 jours est particulièrement marquée pour les aurores australes : pour elle le maximum dépasse la fréquence moyenne de 44 p. 100. En Norvège, pour les aurores boréales, ce chiffre est de 23 p. 100, et en Suède seulement 11 p. 100. Cette période est connue depuis longtemps pour une série d'autres phénomènes, principalement magnétiques, qui sont, comme nous le verrons plus loin, en étroite connexité avec le phénomène des aurores, mais qui s'observent également à l'occasion d'orages et d'accidents dans la pression atmosphérique. On a pendant longtemps cherché quelle relation il pouvait y avoir entre cette période et la rotation du soleil. Le savant autrichien Hornstein a été jusqu'à proposer de déterminer avec une grande exactitude la durée de cette période parce qu'elle « devrait fournir une valeur pour la rotation du soleil, plus exacte que celle donnée par l'observation directe ». Nous savons aujourd'hui que cette rotation n'est pas la même aux différentes latitudes, un fait que Carrington et Spörer avaient déduit du mouvement des taches, mais qui a été définitivement établi par les mesures spectroscopiques faites par Dunér, Halm et Adams du mouvement de la photosphère. Parmi elles, celles d'Adams (1908) semblent les plus précises. Il a déterminé les périodes suivantes de rotation sidérale, auxquelles correspondent les révolutions synodiques également indiquées.

Ce fait que la rotation de la photosphère solaire, et celle des taches, des facules et des protubérances augmente de durée à mesure que la latitude augmente, est un des phénomènes mystérieux de la physique du soleil. On observe quelque chose d'analogue dans les nuages de Jupiter, mais là, les différences sont beaucoup moins marquées. Elles n'atteignent guère que un pour

cent. Les nuages de notre atmosphère terrestre se comportent d'une façon tout opposée, ce qui s'explique aisément par les conditions de la circulation atmosphérique.

Dans le cas que nous considérons, la position du soleil par rapport à la terre a seule de l'importance. On voit que la période de 25,93 jours ne correspond à aucune des durées de rotation synodique d'une partie quelconque de la photosphère solaire. La plus faible différence est celle qui se rapporte à l'équateur, et il semblerait indiqué que ce fut avec celui-ci que nous établissions nos comparaisons, car la terre ne s'écarte jamais beaucoup du plan équatorial solaire. Elle y retourne d'ailleurs périodiquement deux fois par an.

Une autre particularité vient s'ajouter à ce qui précède. Plus un point est éloigné du centre du soleil, plus sa rotation est rapide, sa durée plus courte. Ainsi, la révolution synodique des facules à l'équateur solaire est, — en moyenne —, de 26,06 jours, celle des taches de 26,82 jours et celle de la photosphère de 27,3 jours. En ce qui concerne les masses d'hydrogène qui se trouvent plus haut, c'est-à-dire plus éloignées du centre, Adams a fait voir qu'elles ont, sur toute la surface du soleil, la même vitesse, savoir environ 23 jours de rotation sidérale ou 24,5 jours de rotation synodique. Certaines facules plus éloignées du centre tournent en moins de 26 jours, et nous arrivons ainsi à cette conclusion, que la durée de nos périodes de 25,93 jours est d'accord avec celle de la rotation des facules situées très haut dans la région équatoriale du soleil, et qu'elle est probablement connexe à celle-ci. Cela vient correspondre parfaitement à l'idée que nous nous faisons de la physique du soleil.

C'est en effet dans les courants gazeux ascendants que se forment les facules, dans des couches un peu moins élevées que celles qui produisent les gouttelettes chassées par la pression de radiation. Cette pression est effectivement la plus grande, précisément dans le voisinage des facules.

La même raison fait que la répulsion des poussières solaires est la plus énergique quand les facules sont très développées, c'est-à-dire aux périodes d'une grande activité éruptive du soleil, ce qui correspond encore à l'abondance des taches.

Il est probable que la température des parties périphériques du soleil est plus élevée quand les taches sont nombreuses, que lorsqu'elles sont rares, car les facules et les taches sont les résultats d'une sorte de brassage dans les couches extérieures. Il a pour conséquence d'amener les parties intérieures, plus chaudes, dans l'atmosphère solaire. Certaines observations faites par Saveljeff, à Kiew, sur l'intensité de la radiation solaire, semblent appuyer à ce point de vue. Mais simultanément avec ce phénomène la quantité d'atomes de poussière augmente, tant dans l'atmosphère solaire que dans celle de la terre, et aussi dans l'espace entre les deux astres. L'état nuageux augmente par suite. Ces circonstances font que le rayonnement effectif du soleil sur la terre diminue lorsque le nombre des taches augmente. M. Köppen a constaté que sous les tropiques la température baisse de 0°,32 C au-dessous de la moyenne lorsque les taches atteignent leur maximum. Par contre, cinq ans plus tard, c'est-à-dire un an avant le minimum, cette température atteint son maximum, soit 0°,41 C au-dessus de la moyenne. La même chose se produit dans d'autres régions du globe, mais on s'en aperçoit moins facile-

ment. Le physicien français M. Nordmann a confirmé sous tous les rapports les résultats de M. Köppen.

Il nous reste encore à signaler une autre période, qui est en relation avec les phénomènes des aurores. C'est celle du mois tropique, qui est de 27,3 jours. Cette période est très peu connue encore, il est possible qu'elle dépende de l'état de charge électrique de la lune. Cette période a cela de particulier qu'elle se produit en sens inverse dans les deux hémisphères Nord et Sud. Lorsque la lune se trouve au-dessus de l'horizon, il semblerait qu'elle influe négativement sur la

Fig. 42. — Variations de la déclinaison à Kew, près de Londres, les 15 et 16 novembre 1905. Une grande perturbation, qui se produisit le 15 novembre à 9 heures du soir, correspond à la plus grande intensité de l'aurore. production des aurores, les empêchant. Mais il faut naturellement dans ces cas tenir compte aussi de la gêne qu'apporte aux observations la lumière de la lune.

On sait depuis longtemps, — les observations de Celsius et de Hiorter, en 1741, l'ont fait connaître —, que les aurores influent sur la direction de l'aiguille aimantée. On en a tiré la conclusion que les aurores avaient pour cause des décharges électriques, qui, elles aussi, influent sur l'aiguille. Ces manifestations magnétiques ont, sur les aurores, le grand avantage que leur observation n'est pas gênée par la lumière du soleil ou de la lune. Mais comme nous l'avons déjà dit (p. 138), l'aurore à rayons de la seconde catégorie, produit seule cet effet magnétique (comp. fig. 42 et 43).

Ces variations magnétiques ont absolument les mêmes périodes que les aurores et que les taches solaires. D'abord, en ce qui concerne la période la plus longue de 11,1 années, les observa-

tions ont fait reconnaître que les perturbations, — c'est-à-dire des variations subites dans la position qu'occupe l'aiguille aimantée —, reflètent fidèlement les variations des taches solaires. Dès 1852 cette connexité fut reconnue par Sabine en Angleterre, par Wolf en Suisse et par Gautier en

Fig. 43. — Marche de l'intensité horizontale les 15 et 16 novembre 1905, à Kew. Le 15 novembre une aurore boréale extraordinairement brillante fut observée en Galicie, Allemagne, France, Norvège, Angleterre et Irlande aussi bien qu'en Nouvelle-Écosse (Canada occidental). Son maximum eut lieu vers 9 heures du soir. Déjà vers 6 heures elle se montra exceptionnellement brillante. France. Mais la variation diurne de l'aiguille est également soumise à la même périodicité. L'aiguille aimantée dirige son extrémité Nord vers le Nord avec, dans nos régions, une faible déviation vers l'Ouest. Cette déviation occidentale a son maximum un peu après midi, vers 1 heure. Elle est plus grande en été qu'en hiver, et son mouvement est plus grand de jour que de nuit. Il est donc évident qu'il s'agit ici d'un effet d'influence du soleil. Cela apparaît plus clairement encore quand on compare les changements dans la variation diurne avec le nombre des taches. Nous donnons ici un petit tableau qui enregistre cette variation de la déclinaison à Prague pour les années 1856 à 1889. Les années de maxima et de minima des taches solaires sont seules indiquées, de même que celles des variations magnétiques.

Il est aisé de voir que les années des maxima et des minima concordent à fort peu de chose près pour les deux phénomènes. La concordance est si évidente que l'on peut considérer qu'il y a une relation linéaire entre la variation diurne et le nombre des taches, ce qui résulte des deux dernières lignes du tableau.

La variation annuelle est encore tout à fait la même que celle des aurores. Le tableau ci-dessous le montre par le résumé des variations magnétiques et la comparaison avec le tableau de la page 145. L'unité adoptée pour la mesure de ces variations est la moyenne annuelle elle-même.

M. Van Bemmelen a calculé la variation diurne des perturbations pour les années 1882 et 1895. Ses observations ont été faites à Batavia, dans l'île de Java. Le maximum a lieu à 1 heure de l'après-midi, et sa valeur atteint les 1,83 de la moyenne du jour. Le minimum a lieu à 11 heures du soir ; sa valeur est de 0,48. De 8 heures du soir à 3 heures du matin les perturbations sont aussi peu fréquentes qu'à 11 heures du soir.

La variation la plus grande est celle de l'aiguille de déclinaison. Elle atteint un maximum de 3,26 à midi, et un minimum de 0,14 à 11 heures du soir.

La période d'environ 26 jours (v. p. 147) a été en premier lieu étudiée par Hornstein. Elle a été reconnue par plusieurs savants, Broun, Liznar et C. A. Muller, dans les variations et perturbations magnétiques. Pour Schuster cette période ne serait pas encore démontrée, les observations probantes étant encore trop peu nombreuses.

La lune a une influence peu sensible sur l'aiguille aimantée, ainsi que Kreil l'a fait voir dès 1841. Cette influence est de sens opposé dans les deux hémisphères Nord et Sud. Elle correspond à une sorte de phénomène de marée.

Les rayons ultra-violets émis par le soleil sont fortement absorbés lors de leur passage dans l'atmosphère terrestre. Ils y provoquent l'ionisation des molécules d'air. Cette ionisation est en

général plus active dans les régions supérieures. Les courants d'air ascendants emportent avec eux de la vapeur d'eau, qui arrive à se condenser de préférence sur les ions négatifs. C'est ainsi que les nuages sont pour la plupart chargés d'électricité négative, ce que déjà Franklin parvint à prouver, à l'aide de son cerf-volant. Après que les gouttes d'eau de pluie sont tombées, l'air qui les contenait reste chargé positivement, comme on l'a reconnu par des ascensions de ballons. Les nuages qui se forment aux plus grandes hauteurs sont les plus fortement chargés ; de là vient que sur la terre ferme les orages sont les plus fréquents en été. Là aussi, c'est-à-dire pour les orages, on a reconnu une période de 26 jours, Bezold l'a constaté pour l'Allemagne du Sud, M. Ekholm et moi-même pour la Suède. Leur maximum se produit 8,3 jours après le maximum des aurores, ce qui est à peu près égal à une demi-période.

La période longue du soleil, soit 11,1 années, se marque aussi dans la fréquence des orages. D'après les recherches de Hess sur les orages en Suisse, il y en eut 103,6 par an dans les années 1900–1902 qui étaient pauvres en taches solaires. Le nombre des taches n'y fut que de 5,7 par an en moyenne. Par contre dans les années 1895 et 1905, qui étaient des années de maxima (60,6 taches par an) les orages furent au nombre de 79,3.

La période tropique lunaire de 27,3 jours est observable aussi pour les orages et pour les aurores. Les deux maxima se produisent ensemble, c'est-à-dire quand la lune se trouve le plus bas possible sur l'horizon. Le maximum pour l'hémisphère Nord a lieu une demi-période avant celle de l'hémisphère Sud.

Les diverses stations météorologiques ont réuni une masse considérable de matériaux d'observation, relatifs aux orages et

surtout aux phénomènes magnétiques. Leur étude détaillée est cependant très loin encore d'être faite.

Quelques observateurs, comme Sidgreaves, doutent encore de la corrélation étroite qui existe entre les taches solaires, les aurores polaires et les perturbations magnétiques. Ils remarquent en effet que l'on a constaté le passage sur le soleil de fortes taches, sans que, la terre étant même au point le plus rapproché du soleil, on ait observé un effet magnétique quelconque. Mais la plupart des savants partagent certainement cette opinion que les perturbations de l'aiguille aimantée sont produites par les taches, quand elles passent au méridien solaire faisant face à la terre.

Ainsi, par exemple, Maunder a pu étudier la tempête magnétique et l'aurore qui ont suivi le passage par le méridien solaire d'une grande tache, du 8 au 10 septembre 1898. L'effet maximum en fut constaté environ 21 heures après ce passage au méridien.

De même Riccò a trouvé une différence de 45,5 heures entre le passage d'une tache au méridien et le plus grand effet magnétique. Il a basé ses observations sur 10 cas, où il a été possible de faire des observations d'une grande précision. Il a de même soumis au calcul les observations qui avaient été faites par Ellis, et que Maunder avait étudiées. Elles lui ont fourni des chiffres sensiblement pareils : la différence serait, dans cette série, de 42 heures et demie.

Ces résultats correspondent à une vitesse moyenne des poussières solaires de 910 et 980 kilomètres par seconde. Il n'y a du reste aucune difficulté à calculer le temps que mettrait une goutte de 0,00016 mm. de diamètre (cette dimension est celle qui cor-

respond à la plus grande vitesse) et ayant le poids spécifique de l'eau, pour venir du soleil jusqu'à la terre. Elle sera soumise, pour cela, à l'action de la pesanteur exercée par le soleil, et à celle de la force répulsive qui est environ 2,5 fois plus grande.

On trouve comme résultat de ce calcul 56 heures, ce qui correspond à une vitesse moyenne de 740 kilomètres par seconde. Pour que cette poussière solaire pût se mouvoir aux vitesses déterminées par Riccò, sa densité devait être inférieure à l'unité, soit 0,66 et 0,57. Cette valeur n'a rien d'invraisemblable si l'on admet que les gouttelettes sont formées de carbures d'hydrogène, contenant en dissolution de l'hydrogène, de l'hélium et d'autres gaz nobles. Ainsi que nous en avons fait la remarque plus haut, à propos des queues cométaires, on arrive à des vitesses plus grandes pour la poussière solaire si l'on suppose qu'elles sont formées de margarites feutrées de carbone, de silicates ou de fer, toutes matières qui sont les parties constituantes principales des météorites.

Il convient peut-être de faire remarquer ici, que la lumière de l'aurore, examinée spectroscopiquement, a donné comme raie principale, celle du gaz noble le krypton. Comme ce gaz n'existe dans notre atmosphère que dans des proportions infinitésimales, il n'est pas improbable qu'il soit apporté par les poussières solaires, et que son spectre soit produit par la libération de sa charge électrique. Les autres raies données par les aurores sont celles de l'azote, de l'argon et des autres gaz nobles. Mais la quantité de ces gaz nobles qui est transportée de cette façon dans l'atmosphère est certainement extrêmement insignifiante.

Les phénomènes électriques de notre atmosphère ont une importance relativement grande en ce qui concerne la vie orga-

nique, et par conséquent aussi pour l'homme. C'est par des décharges électriques que l'azote de l'air arrive à se combiner avec l'oxygène et avec l'hydrogène et à produire ainsi les combinaisons ammoniacales, les nitrites et les nitrates dont l'importance pour la végétation est aujourd'hui reconnue. Il semble que ces combinaisons ammoniacales, qui jouent un si grand rôle dans les contrées tempérées, soient produites surtout par les décharges tranquilles, qui correspondent à la nature des aurores. Au contraire les combinaisons oxygénées qui abondent dans les régions tropicales sont plutôt le produit des orages. Elles arrivent au sol par la chute des pluies, et elles y produisent leurs effets bienfaisants sur la végétation. La quantité d'azote ainsi liée par des combinaisons chimiques, qui se répand dans le sol, s'élève, en Europe, à environ 1,25 gr. par mètre carré et par année. Sous les tropiques il y en a environ quatre fois plus. Si l'on admet une moyenne de 3 grammes pour l'ensemble des parties continentales du globe, cela correspond à 3 tonnes par kilomètre carré, et pour toute la terre ferme (136 millions de kilomètres carrés) à 400 millions de tonnes par an. Une très faible partie seulement de ce total tombe sur des terres cultivées, mais le surplus n'est pas pour cela entièrement perdu. Les forêts, les steppes herbeux, etc., en profitent.

Il peut être intéressant de mettre ces chiffres en regard de ceux de la consommation des nitrates du Chili. Ceux-ci donnèrent à l'agriculture, en 1880, 50 000 tonnes, en 1890, 120 000 tonnes, en 1900, 210 000 tonnes et en 1905, 260 000 tonnes. Il faut ajouter à ces nitrates naturels les produits azotés que livrent les usines à gaz sous forme de sels ammoniacaux. On peut les estimer au quart environ de la quantité des nitrates. À ce total il faudrait encore ajouter la production en sels

ammoniacaux des États-Unis, mais ce que nous avons dit suffit pour se rendre compte que l'azote artificiel, répandu sur la terre pour favoriser la végétation, ne s'élève pas à la millième partie de celle que fournit directement la nature.

On peut évaluer à 3 980 billions de tonnes la quantité d'azote que contient l'atmosphère terrestre. C'est dire que les combinaisons résultant de l'action de l'électricité n'affectent annuellement qu'un trois millionième de cette quantité totale, — en admettant que l'océan reçoit autant de produits azotés que la terre ferme. L'azote ainsi combiné fait prospérer la végétation terrestre ou aquatique. Après que l'activité vitale des plantes a parcouru son cycle, cet azote retourne soit dans l'atmosphère, soit à l'océan, dont la teneur en azote se trouve, par la dissolution, en équilibre avec celui de l'air. Il n'y a donc pas à craindre une diminution sensible de l'azote de l'air, ce qui concorde avec ce fait qu'aucune accumulation progressive des combinaisons azotées n'a été remarquée, ni dans les parties solides ni dans les parties liquides du globe.

Comparons ces faits avec ce qui se passe pour l'acide carbonique (voy. p. 61). Le cycle annuel de la végétation du globe n'en absorbe pas moins d'un cinquantième du contenu de l'atmosphère. Comme cet acide carbonique est la source de production de l'oxygène, et que l'air contient, en volume, à peu près sept cents fois plus que l'acide carbonique, la circulation, par combinaison, de l'oxygène de l'air, en affecte environ la 35 000 partie. En d'autres mots, l'oxygène de l'air prend part aux phénomènes de la végétation environ cent fois plus que l'azote, ce qui est d'ailleurs tout à fait d'accord avec les propriétés chimiques plus actives de ce corps.

Les particules négativement chargées, qui, venant du soleil, se trouvent transportées dans les parties supérieures de l'atmosphère terrestre, se déchargent de leur électricité, comme nous l'avons vu, par les aurores, en partie vers la terre. Par suite il y a augmentation de la charge négative de la terre, concordante avec l'augmentation des taches solaires. Cette charge se mesure par ce qu'on appelle l'électricité atmosphérique, c'est-à-dire, par la diminution du potentiel électrique mesuré en volts, par mètre de hauteur, lorsque l'air est pur. À Kew, près de Londres, Chree trouva qu'en moyenne le potentiel augmentait de 147 volts par mètre de hauteur dans les années de minima 1900 à 1902. Cela représente 8 p. 100 de moins que la moyenne des années d'observation 1898 à 1904, où la moyenne de l'accroissement du potentiel fut de 159 volts par mètre.

Avant de quitter ce sujet, il nous faut brièvement faire mention d'un phénomène très singulier, connu sous le nom de lumière zodiacale. On voit cette lumière toutes les nuits lorsque le temps est clair, quelques heures avant ou après le lever ou le coucher du soleil. Dans nos régions il est rare de l'apercevoir, sinon aux environs des équinoxes. On le décrit en général comme un cône de lumière dont la base est près de l'horizon, et dont l'axe se trouve près du plan de l'écliptique, — le zodiaque. De là son nom.

Le spectre de cette lumière est continu, d'après Wright et Liais. On affirme que sous les tropiques sa luminosité est égale à celle de la voie lactée.

Il n'y a aucun doute que cette lumière est produite par des particules poussiéreuses éclairées par le soleil. On pensait, en conséquence, que cette poussière formait, autour du soleil, un anneau, et que cet anneau était un résidu de cette nébuleuse pri-

mitive, qui, d'après l'hypothèse de Kant et de Laplace a été l'origine de la condensation de notre système solaire.

Parfois on remarque, partant de la pointe extrême de la
Fig. 44. — Lumière zodiacale sous les tropiques. lumière zodiacale, une bande lumineuse faible, qui s'étend tout en travers du ciel nocturne, dans le plan de l'écliptique. Dans la région qui est en opposition directe avec le soleil, cette bande s'élargit, et semble plutôt une tache lumineuse, grande, diffuse, et peu définie. Elle a environ 12 degrés de largeur et 9 degrés de hauteur. On la désigne en général sous le nom de reflet (Gegenschein). Elle fut décrite pour la première fois par Pezenas, en 1780.

L'explication la plus plausible de ce reflet, est qu'il est produit par de petites météorites ou par des particules poussiéreuses incandescentes, qui sont en voie de tomber vers le soleil. Tout comme la position réelle de la couronne de l'aurore boréale, il semble que celle de ce reflet ait pour cause un effet de perspective. Les trajectoires de ces petits corps seraient dirigées vers le soleil, et doivent par conséquent paraître émaner d'un point qui lui est directement opposé par rapport à la terre.

Mais nous ne savons encore que fort peu de chose de ce Gegenschein. La position même de la lumière zodiacale, le long de l'écliptique, a été mise en doute, car des observations plus récentes semblent indiquer qu'elle se trouverait plutôt dans le plan de l'équateur solaire. Quoi qu'il en soit, l'opinion paraît bien fondée, qui veut que sa lumière provient de corpuscules qui viennent du soleil ou qui y tombent. Pour nous, c'est là une confirmation que la masse de poussière solaire est certainement considérable, et qu'on peut bien la considérer comme la cause qui produit ces étranges apparitions.

06

Nous avons vu, dans les pages précédentes, que le soleil répand annuellement des quantités presque inconcevables de chaleur : environ 3,8×10 petites calories, c'est-à-dire qu'il perd deux calories par gramme de sa masse par an. Nous avons également pu nous faire une idée comment il est possible, en raison de l'énormité de la provision de calorique du soleil, que cette émission puisse se continuer pendant des billions d'années.

Mais il faudra finalement et malgré tout, qu'il arrive un moment où ce soleil se refroidira, et que, comme cela est déjà arrivé à la terre et arrivera aux planètes actuellement gazéiformes, il s'enveloppe d'une croûte solidifiée. Nul être vivant n'assistera, plein de désespoir, sur aucune des planètes de notre système, à cette extinction du soleil. Il y aura longtemps, malgré tous les efforts ou toutes les inventions, que la vie sera éteinte sur tous ses satellites, par suite de la diminution graduelle de la chaleur et de la lumière vivifiantes de l'astre central.

Les transformations ultérieures du soleil ressembleront alors à celles que parcourt actuellement notre globe, à la différence près, qu'il n'y aura pas d'autre centre lumineux et calorifique comme celui qui nous octroie la vie. Au début, la mince croûte qui se formera se brisera sans cesse sous l'effort des masses de laves et de gaz qui s'échapperont de l'intérieur de l'astre. Mais ces puissants épanchements se solidifieront à leur tour, et les portions brisées se rejoindront plus solidement qu'avant. Il subsistera, sur quelques fentes primitives, des volcans qui, par suite du refroidissement graduel intérieur, expulseront les masses ga-

zeuses libérées, consistant surtout en vapeur d'eau et, en plus faible quantité, en acide carbonique.

Puis viendra la condensation de la vapeur d'eau. Des océans se formeront à la surface du globe solaire, et pendant un peu de temps il ressemblera, dans une certaine mesure, à notre terre. Mais la différence marquée ci-dessus subsistera : le soleil éteint ne recevra pas du dehors la chaleur vivifiante qui est la cause de notre existence. Il ne recevra que le faible rayonnement venu de l'espace céleste, et la petite quantité de chaleur que peut produire la chute des météorites.

La température s'abaissera donc rapidement sur ce soleil éteint. Les nuages de son atmosphère deviendront de plus en plus maigres, et ne protègeront plus sa surface contre la radiation de ce qui reste de chaleur. L'océan formé se recouvrira de glace. L'acide carbonique commencera à se déposer sous forme d'une fine neige blanche. Enfin, lorsque la température sera descendue à –200 degrés, de nouvelles mers se formeront, par suite de la condensation des gaz longtemps appelés permanents, et en particulier de l'azote. Encore un abaissement de quelque 20 degrés et l'énergie contenue dans les météores qui tomberont à la surface couvrira tout juste la perte de chaleur qui subsiste encore. À ce moment l'atmosphère du soleil ne contiendra plus que de l'hélium et de l'hydrogène, les deux gaz les plus résistants à la liquéfaction, et un reste d'azote.

Arrivé à ce point, le soleil ne rayonnera plus aucune chaleur, sinon d'une façon insensible. Actuellement, chaque kilomètre carré de la surface terrestre ne rayonne, par suite de sa faible conductibilité, que la milliardième partie à peu près de la chaleur qu'une surface égale émet sur le soleil. Lorsque l'épaisseur de la

croûte solaire aura atteint une soixantaine de kilomètres, son émission de chaleur sera descendue à des proportions analogues. La température de sa surface sera peut-être de 50 à 60 degrés au-dessus du zéro absolu, et ne s'élèvera plus haut que pour très peu de temps, sur des étendues très limitées, là où il se produira des éruptions volcaniques.

Mais à l'intérieur du globe solaire, il subsistera encore une température presque aussi élevée que celle d'aujourd'hui, à savoir, quelques millions de degrés. Il s'y trouvera encore les mêmes combinaisons infiniment explosives que maintenant. Semblable à un colossal magasin de dynamite, le soleil obscur vaguera dans l'espace, sans subir, en des billions d'années, aucune perte sensible d'énergie. Immuable comme serait un spore inaltérable, il conservera sa puissance énorme jusqu'à ce que des circonstances extérieures le réveillent à une nouvelle existence, analogue à la précédente. Une lente contraction de la surface extérieure, causée par la perte continue de chaleur, et la diminution des dimensions qui en résultent, donnera à cette surface des rides de vieillesse.

Admettons, pour nous rendre compte, que la croûte qui recouvrira le soleil, comme aussi celle actuelle de la terre, ait la même conductibilité pour la chaleur que le granit. D'après M. Homén, celui-ci laisse passer, par une lame de 1 centimètre d'épaisseur, dont les deux faces ont une température qui diffère de 1 degré, et sur une surface d'un centimètre carré, 0,582 calories C. G. S.

La croûte terrestre, dont la température augmente de 30 degrés par kilomètre de profondeur, laisserait ainsi passer par minute et par centimètre carré : 1,75×10 calories. Comme la terre reçoit en moyenne 0,625 calories par minute et par centimètre

carré, cette quantité représente seulement la 3 580 partie de ce qu'elle reçoit.

Le soleil, à lui supposer une croûte égale à celle de la terre et un diamètre 108,6 fois plus grand, perdrait 3,3 fois plus de chaleur par minute, que la terre ne reçoit actuellement de ce même soleil. En l'état présent, il perd 2 260 millions de fois plus que la terre n'en reçoit. Sa perte serait donc au moment dont nous parlons, 686 millions de fois plus petite que celle d'aujourd'hui. Si l'épaisseur de la croûte solaire atteignait le 140 de son rayon, c'est-à-dire qu'elle eût la même proportion que celle de la terre, le soleil ne perdrait pas, en 74 500 millions d'années, plus de chaleur qu'il n'en perd actuellement en un an. Ce chiffre est à diminuer quelque peu en raison de la température plus froide qu'aura à ce moment-là la surface extérieure du soleil, et on peut l'évaluer à 60 000 millions d'années environ. Comme la température moyenne du soleil peut bien être d'environ 5 millions de degrés centigrades ; son refroidissement jusqu'à 0 degré (en supposant que sa capacité calorifique soit égale à celle de l'eau) prendrait 150 000 billions d'années. Pendant ce temps l'épaisseur de la croûte augmenterait toujours et le refroidissement deviendrait de plus en plus lent. En tout cas on peut dire que dans des conditions semblables, la perte totale d'énergie en 1 000 billions d'années ne serait qu'une fraction des plus minimes de la quantité d'énergie renfermée encore dans le soleil.

Àsupposer qu'un astre éteint chemine dans l'espace pendant des temps qui nous feraient l'effet d'être incommensurables, il finira néanmoins par en rencontrer un autre, — lui-même lumineux ou éteint. La probabilité d'une semblable rencontre s'accroît considérablement par la déviation que subira sa trajectoire par

suite de la force attractive des deux corps qui se rapprochent. Les étoiles qui sont nos plus proches voisines sont à une distance telle que la lumière met en moyenne 10 ans pour parvenir du soleil jusqu'à elles. Or le soleil se déplace avec une vitesse de 20 kilomètres par seconde. À ce compte, sa rencontre avec une étoile de même nature générale ne se produirait qu'au bout de 100 000 billions d'années.

Mais supposons qu'il existe dans les profondeurs célestes cent fois plus d'astres éteints qu'il n'y en a de lumineux, — hypothèse qui n'est nullement indéfendable. Le temps probable qui s'écoulera jusqu'à la prochaine rencontre sera de 1 000 billions d'années. La période pendant laquelle un soleil reste lumineux n'est guère qu'un centième de ce temps, soit 10 billions d'années. Il n'y a rien d'extraordinaire à ce chiffre, car la vie existe sur la terre depuis environ un milliard d'années, et cette durée n'est qu'une fraction très petite de celle pendant laquelle le soleil a envoyé et enverra encore de la lumière.

Il y a une probabilité naturellement bien plus grande que le soleil rencontrera quelque nébuleuse, car celles-ci occupent des espaces beaucoup plus étendus qu'un astre. Mais il n'est pas improbable que dans ce cas les choses se passeront comme lors de la traversée de la couronne solaire par quelque comète. On n'observe en ce cas aucun effet, aucun phénomène particulier provenant de la rencontre, et cela, à cause de la rareté de la matière constituant la couronne. Néanmoins l'entrée dans la nébuleuse accélèrera probablement beaucoup la rencontre avec un autre soleil quelconque, car, ainsi que nous le montrerons plus loin, les nébuleuses recèlent, en quantité notable, des corps célestes lumineux aussi bien qu'obscurs.

Nous voyons, de temps en temps, des étoiles nouvelles s'allumer subitement dans la voûte céleste. Elles diminuent ensuite d'intensité, puis elles s'éteignent, ou tout au moins descendent-elles jusqu'à une luminosité extrêmement faible. Le plus remarquable d'entre ces événements très intéressants fut celui que l'on observa en février 1901, où une étoile nouvelle se montra tout à coup dans la constellation de Persée. Elle fut vue en Écosse par Anderson, le 22 février au matin ; elle était à ce moment un peu plus lumineuse qu'une étoile de troisième grandeur. Une photographie de la région du ciel où elle se trouvait, faite 28 heures avant qu'on la découvrît, ne montre encore aucune trace de son existence, bien que les étoiles de 12 grandeur aient produit leurs empreintes sur la plaque. Cela semblerait indiquer que dans ce court espace de temps la puissance lumineuse de la nouvelle étoile s'est accrue de plus de cinq mille fois sa valeur initiale.

Le 23 février sa lumière était plus forte que celle de n'importe quelle autre étoile, Sirius excepté. Le 25 février elle était de première grandeur, le 27 février, de deuxième, le 6 mars, de troisième, le 18 mars, de quatrième grandeur. Ensuite sa luminosité varia irrégulièrement, jusqu'au 22 juin, par périodes de trois, puis de cinq jours, tandis que sa clarté moyenne diminuait graduellement. Le 23 juin elle n'était plus que de sixième grandeur. La lumière diminua après cela plus régulièrement, passant à la septième grandeur en octobre 1901, à la huitième en février 1902, à la neuvième en juillet, et à la dixième en décembre 1902. Depuis lors elle a diminué peu à peu jusqu'à la 12 grandeur.

Lorsque l'éclat de cette Nova Persei était le plus grand, sa lumière était d'un blanc bleuâtre. Sa couleur passa plus tard au jaune, puis au rouge dans le commencement de mars. Pendant

les variations périodiques d'éclat (mars–juin) sa couleur était blanc jaunâtre au moment le plus lumineux, et rougeâtre au moment le plus faible. Plus tard la couleur devint blanc pur.

Le spectre de cette étoile a montré les plus grandes analogies avec celui d'une autre étoile nouvelle, apparue dans la constellation du Cocher (Nova Aurigæ, 1892, voy. fig. 45).

Une caractéristique presque générale des étoiles nouvelles consiste en ce que leurs raies spectrales sont doubles. Chacune de ces raies dédoublées est obscure vers l'extrémité violette du spectre, et brillante du côté du rouge. Le spectre de la Nova Aurigæ présenta cette particularité surtout aux lignes C, F et H de l'hydrogène, à la ligne du sodium, à celles que l'on trouve dans les nébuleuses, et enfin à celle du magnésium. Dans le spectre de la Nova Persei le déplacement des lignes de l'hydrogène vers le violet est si grand, qu'on en a déduit que le gaz absorbant la lumière devait se mouvoir dans notre direction
Fig. 45. — Spectre de l'étoile nouvelle du Cocher, en 1892. avec une vitesse de 700 kilomètres par seconde, sinon plus. Quelques lignes du calcium présentaient un déplacement analogue ; pour d'autres lignes métalliques il était plus faible.

Que faut-il conclure de cet ensemble d'observations ? Que l'étoile envoyait dans notre direction des masses de gaz, de température relativement faible, mais cheminant à des vitesses énormes. Les parties lumineuses de l'étoile étaient ou immobiles, ou bien s'éloignaient de nous. L'explication la plus plausible est celle donnée par la supposition qu'en devenant lumineux, l'astre, par suite de sa température très élevée, et des pressions considérables, a donné des lignes spectrales très élargies, dont la partie violette a été absorbée par des masses gazeuses refroidies par

leur violente expansion, et projetées de notre côté. Il va de soi que ces gaz devaient être lancés dans tous les sens autour de l'étoile ; seulement notre observation ne pouvait porter que sur ceux qui absorbaient la lumière en s'interposant entre l'étoile et nous, et qui par conséquent, étaient projetés dans notre direction.

Petit à petit les lignes métalliques ainsi que le spectre continu diminuèrent. Ce fut d'abord dans la région du violet, pendant que les lignes de l'hydrogène et celles des nébuleuses restaient encore très nettes. Au bout de quelque temps, l'étoile donna, comme d'autres étoiles nouvelles, le spectre habituel des nébuleuses. Ce fait remarquable fut observé pour la première fois par H. C. Vogel, à propos d'une nouvelle étoile apparue dans le Cygne (Nova Cygni, 1876). Une autre étoile du Cygne, P, qui parut s'enflammer subitement en 1600, donne aujourd'hui encore un spectre qui indique une émission d'hydrogène. Il n'est pas impossible que cette étoile « nouvelle » ne soit pas encore parvenue à son état d'équilibre, mais qu'elle émette encore, d'une façon continue, des flots de gaz froids. Il ne faut, pour provoquer la production de bandes d'absorption, que des quantités minimes de gaz, de sorte que cette perte de gaz peut durer très longtemps, tant que la provision existante n'est pas épuisée.

Des observations récentes, faites en 1908 par M. Hartmann, à Potsdam, ont établi que la Nova Persei est actuellement une étoile fixe du type étudié par Wolf et Rayet, qui est désigné par les noms de ces deux astronomes. Ce type est caractérisé, au spectroscope, par des raies mêlées, lus unes brillantes, les autres sombres, les raies claires appartenant principalement à l'hydrogène. D'autres étoiles nouvelles ont également passé à ce type.

Telles sont celle de 1866, apparue dans la Couronne boréale, et celle de 1876, du Cygne. Des mesures très exactes faites sur ces étoiles ont révélé qu'elles sont entourées d'une épaisse atmosphère d'hydrogène, dont les raies brillantes deviennent parfois visibles lorsque l'image de l'étoile centrale proprement dite se trouve tout à fait voisine de la fente du spectroscope. On a évalué la dimension de cette atmosphère d'hydrogène comme égale à l'orbite de Neptune. Ces singulières étoiles sont des exemples de l'état le plus primitif de l'évolution des astres. On peut les considérer comme des étoiles chaudes, entourées de nébulosités épaisses.

Nous avons déjà parlé (voy. p. 127) des singuliers nuages lumineux qui ont entouré la Nova Persei lors de son apparition. Deux nuées annulaires s'éloignaient de l'étoile centrale, avec des vitesses respectives de 1,4 et de 2,8 secondes d'arc par jour. Ces nuées furent observées du 29 mars 1901 jusqu'en février 1902. Si l'on cherche à remonter en arrière jusqu'au moment où ces nuées ont dû quitter l'étoile elle-même, on arrive aux dates du 8 et du 16 février, dates qui coïncident de très près avec les moments où la luminosité fut la plus grande, constatée le 23 février. Il semble donc indubitable qu'elles partirent de l'étoile à leur origine, et qu'elles étaient la conséquence d'une force répulsive de radiation. Leur lumière n'a montré aucune polarisation appréciable, et ne peut donc pas être de la lumière réfléchie. Elle est très probablement le résultat des décharges électriques entre particules poussiéreuses qui rendent lumineux les gaz absorbés par ces poussières.

Nous avons donc évidemment été les témoins, dans ce phénomène de la Nova Persei, de la fin grandiose de l'existence d'un

corps céleste, en tant qu'unité indépendante. Cette fin s'est produite par la rencontre avec un autre corps de même nature. Les astres qui se sont rencontrés étaient tous deux obscurs, ou tout au moins rayonnaient-ils si peu de lumière, qu'à eux deux ils ne brillaient même pas autant qu'une étoile de douzième grandeur.

Après leur rencontre, leur lumière était plus puissante que celle d'une étoile de première grandeur, et cela malgré que leur distance fut d'au moins 120 années-lumière. Il fallait donc que leur rayonnement dépassât de plusieurs milliers de fois celui de notre soleil. Dans de semblables conditions la pression de radiation était naturellement un grand nombre de fois celui de la surface solaire. Les masses poussiéreuses, expulsées par l'étoile nouvelle, ont dû avoir une vitesse beaucoup plus grande que celle de notre soleil. Cette vitesse n'a pas pu, cependant, égaler celle de la lumière elle-même, qui ne peut jamais être complètement atteinte par l'effet de la pression de radiation.

Il n'est pas difficile de se faire une idée de la force énorme sous laquelle s'est produite cette collision de deux mondes. Un corps quelconque, une météorite par exemple qui, des espaces célestes, se précipite sur le soleil, acquiert, au moment de sa chute sur celui-ci, une vitesse de 600 kilomètres par seconde. La vitesse de chacun des deux globes qui se sont rencontrés doit avoir été du même ordre.

Ce choc est en général un choc oblique. Bien qu'une partie de l'énergie dépensée se soit transformée en chaleur, le surplus doit donner à l'ensemble une vitesse de rotation de plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Celle actuelle de notre soleil, — 2 kilomètres par seconde à l'équateur —, est infiniment petite par rapport à celle-là ; plus encore celle de notre globe terrestre, qui

n'est que de 0,465 km. par seconde à l'équateur. Nous ne commettrons donc point d'erreur bien grande en négligeant la vitesse de rotation que pouvaient avoir l'un et l'autre corps avant leur rencontre.

La collision aura fait jaillir des deux corps, perpendiculairement à leurs trajectoires primitives, deux puissants jets de matière, situés sensiblement dans le même plan. La vitesse de ces jets de matière dépendra de la vitesse de rotation du corps double qui s'est formé, vitesse qui, d'ailleurs, s'en trouve diminuée (voy. fig. 46). Rappelons ici, que lorsque de la matière provenant du centre arrive à la surface du soleil, elle s'y comporte forcément comme un corps puissamment explosif. Les gaz expulsés seront violemment poussés en avant par la rotation de la partie centrale. Nous pouvons nous faire une représentation approximative de la figure que présentera cet objet, en considérant une roue tournant très rapidement et qui aurait aux extrémités d'un de ses diamètres deux fusées d'artifice, lançant dans le sens de la tangente, des jets de feu. Plus les jets sont longs, moins leur vitesse sera grande, moins grande aussi la vitesse angulaire desdits jets.

Il en est de même pour l'étoile. La puissante expansion des gaz projetés causera leur rapide refroidissement. Les jets

Fig. 46. — Figure schématique, indiquant les conséquences d'un choc entre deux soleils éteints A et B, qui cheminaient dans la direction des flèches. — Il en résulte une violente rotation dans le sens des flèches courbes. Deux puissants jets gazeux s'échappent par suite du dégagement de la décomposition des couches profondes contenant des combinaisons explosives, ramenées à la surface par le choc. gazeux contiennent d'ailleurs aussi beaucoup

de poussière fine, probablement surtout de carbone, qui auparavant se trouvait en combinaison dans les matières explosives. Les nuages de fines poussières ombragent de plus en plus l'étoile nouvelle, et font que sa lumière blanche passe successivement au jaune et au rouge, car les poussières fines absorbent de préférence les rayons bleus ou verts, plutôt que les jaunes et les rouges.

Au début, ces nuées se trouvaient à proximité immédiate du corps de l'étoile ; leur vitesse angulaire était extrêmement grande, et elles devaient l'envelopper entièrement. Mais dès le 22 mars les extrémités des jets s'étaient étendus au loin, la durée de leur révolution s'était allongée à six jours, et le corps central se trouva plus obscurci lorsque les parties extérieures des jets s'interposaient entre lui et nous par le fait de la rotation. À mesure que ces jets s'allongeaient, la durée de leur révolution s'étendit graduellement jusqu'à 10 jours. L'étoile en devint périodique, avec une période lentement croissante. Son éclat était plus rouge lors du minimum que par le maximum.

La capacité d'absorption des bords extrêmes du jet diminuait pendant ce temps, soit parce que ses dimensions s'agrandissaient, soit parce que la poussière s'agglomérait petit à petit en grains plus gros, peut-être aussi parce que les parties les plus fines étaient déjà rejetées au loin par la radiation. Il s'ensuivait que la filtration de la lumière à travers les poussières diminuait, en ce que les rayons rouges et jaunes pouvaient de nouveau passer plus librement que les bleus et les verts ; la teinte de la lumière devenait plus grisâtre et retournait au blanc pur après quelque temps.

Cette couleur blanche qui subsiste est l'indice que l'étoile possède encore une température très élevée. Par l'expulsion continue des masses gazeuses saturées de poussières, dont la violence diminue petit à petit, la clarté de l'étoile, telle que nous l'apercevons, s'atténue. Le noyau lumineux est de plus en plus uniformément entouré des couches poussièreuses. Mais la puissance même de l'explosion est démontrée par ce fait que les masses d'hydrogène expulsées en premier lieu se précipitaient vers l'observateur placé sur notre globe, avec une vitesse d'au moins 700 kilomètres par seconde. Cette vitesse est du même ordre que celle constatée dans les protubérances solaires les plus violemment projetées.

Ainsi qu'on le voit, la manière dont nous nous représentons l'événement qui a causé l'apparition de la Nova Persei donne jusque dans les détails une image assez fidèle de la succession des faits : il est très probable que dans ses traits principaux, elle est exacte. Mais qu'est devenue maintenant l'étoile nouvelle ? L'analyse spectrale nous fait savoir que, comme d'autres étoiles nouvelles elle a été transformée en nébuleuse stellaire. La lumière continue du corps central a été graduellement atténuée par les masses poussiéreuses environnantes. Celles-ci sont chassées par la pression de radiation vers les régions extérieures des masses gazeuses qui enveloppent le noyau, et qui sont principalement de l'hydrogène, de l'hélium et du « nébulium ». La poussière y décharge son électricité négative, ce qui produit une luminosité absolument semblable à celle que nous manifestent les nébuleuses proprement dites.

Ajoutons à cela que par la rotation, d'une violence inouïe, de la masse centrale des deux étoiles fusionnées, les parties exté-

rieures en sont soumises à l'effet d'une force centrifuge des plus importantes. Elle transformera cette masse tournante en un immense disque. La pression étant, au pourtour, comparativement faible, la densité des gaz y sera également très modérée. Cette forte dilatation, et plus encore la grande radiation de la chaleur, diminueront rapidement la température. Nous aurons donc un grand astre central, dont l'intérieur aura une densité importante et qui ressemblera, par conséquent, aux soleils que nous connaissons, mais dont les parties extérieures seront très peu denses, et de nature nébuloïde. Autour de ce corps central se trouveront les restes des deux faisceaux ou jets gazeux qui furent expulsés aussitôt après le choc. Une partie importante de la matière contenue dans ces parties extérieures qui formeront spirale, s'éloignera sans doute, se répandant dans l'immensité environnante, pour être ultérieurement aggloméré par d'autres corps célestes, ou encore pour former des parties des grandes nébuleuses irrégulières que nous voyons comme des brouillards épais autour des amas d'étoiles. Une autre partie qui est retenue par le corps central, restera animée d'un mouvement circulaire autour de lui. Par suite de ce lent mouvement rotatoire les contours des deux spirales s'effaceront petit à petit, et celles-ci prendront de plus en plus la forme d'anneaux entourant le corps central.

La forme en spirale (voy. fig. 47 et 48) des parties extérieures des nébuleuses a depuis longtemps attiré tout particulièrement l'attention. On a remarqué presque partout que deux bras de spirale semblent serpenter autour du noyau. Cela indique que la matière se trouve animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe central, d'où elle a été projetée de deux côtés opposés. Parfois la nébuleuse est fusiforme, et parmi celles-là, la grande nébuleuse d'Andromède (fig. 49) est la plus connue. L'observa-

tion fait cependant voir, lorsqu'elle est faite à l'aide des instruments les plus puissants, que celles-là sont également spiraloïdes, bien qu'elles nous paraissent fusiformes parce que nous les voyons de côté. M. Keeler, le célèbre astronome américain qui, plus que tout autre, s'est occupé des nébuleuses, en a relevé des nombres considérables, dans toutes les parties du ciel qui fussent accessibles à son observation, et il a trouvé que ces formations sont en grande majorité de forme spiraloïde.

Quelques-unes, auxquelles on donne le nom de nébuleuses planétaires, nous apparaissent plutôt comme des sphères lumineuses. Nous pouvons supposer dans ce cas, que l'explosion qui les créa, fut moins violente. Les spirales sont par suite si resserrées qu'elles se sont confondues. Peut-être que des inégalités existantes se sont compensées dans le cours des temps. Un certain nombre de nébuleuses sont annulaires, comme celle bien connue de la Lyre (fig. 50). Celles-là encore, peuvent avoir pour origine une forme en spirale, dont la rotation a graduellement effacé les traits, et où la matière nébuleuse voisine du centre s'est condensée sur des planètes circulant

Fig. 47. — Nébuleuse spirale des « Chiens de Chasse » (Messier 51). Photographie de l'observatoire de Yerkes du 3 juin 1902. Échelle 0,001 m. = 13,2 secondes d'arc. autour de l'astre. Schaeberlé, un autre astronome américain affirme avoir observé dans cette nébuleuse aussi, des traces de structure en spirale.

Une autre sorte encore de nébuleuses est ordinairement très étendue, irrégulièrement formée, et consiste évidemment en une matière excessivement ténue. Les plus connues d'entre celles-ci sont celle d'Orion (fig. 51), celles des Pléiades (fig. 52)

Fig. 48. — Nébuleuse spirale du Triangle. (Messier 33). Photographie de l'observatoire de Yerkes des 4 et 6 septembre 1902. Un millimètre = 30,7 secondes d'arc. et celle du Cygne (fig. 53). Dans toutes celles-ci on a trouvé des portions affectant la forme de spirales.

Nous venons d'expliquer comme quoi la formation qui résulte de la rencontre de deux corps célestes devait en général

Fig. 49. — La grande nébuleuse d'Andromède. Photographie de l'observatoire de Yerkes, du 18 septembre 1901. Un millimètre = 54,6 secondes d'arc. avoir le caractère d'une spirale à deux branches. Mais si le choc est de telle nature que les centres des deux corps avancent l'un vers l'autre sur la même droite, il ne saurait naturellement s'en former aucune, mais bien un disque. Si l'une des étoiles est petite, c'est un cône qui peut en résulter, par suite de l'expansion plus égale des gaz dans tous les sens autour de l'axe de la rencontre. Un semblable choc parfaitement axial doit naturellement être peu fréquent, mais il peut se présenter des cas qui se rapprochent plus ou moins de la limite, surtout

Fig. 50. — Nébuleuse annulaire de la Lyre.
Photographie de l'observatoire de Yerkes. si la vitesse du corps est faible. Il se peut encore qu'une spirale peu marquée se transforme, par lente diffusion, en un corps tournant, plat, en forme de disque.

Les dimensions de cette formation nébuleuse dépendront des relations qu'il y aura entre la masse de l'ensemble et la vitesse d'émission des gaz. Si, par exemple, deux soleils éteints, ayant comme grandeur et comme masse celles du nôtre venaient à se rencontrer, il y aurait des masses gazeuses qui s'élanceraient vers l'espace avec des vitesses de plus de 900 kilomètres par seconde.

D'autres éléments, repoussés et animés de vitesses plus faibles, resteraient dans le voisinage du corps nouveau, et cela, d'autant plus que leurs vitesses seraient moindres. Ils retomberaient donc de nouveau sur lui, et y seraient incorporées, si deux circonstances ne les en empêchaient.

Fig. 51. — Partie centrale de la grande nébuleuse d'Orion. Photographie de l'observatoire de Yerkes. Un millimètre = 12 secondes d'arc.

L'une d'elles est l'énorme puissance de radiation de la masse centrale incandescente. Une grande quantité de poussières seraient maintenues en suspension, et avec elles, par frottement, les masses gazeuses avoisinantes. Les énormes masses poussiéreuses absorbant la majeure partie de la radiation, des parties ultra-fines seraient seules transportées aux confins de la nébuleuse. Mais au bord extérieur extrême la poussière même la plus fine ne pourrait être maintenue en suspension, la radiation diminuant très rapidement par suite de l'absorption. Il en résulterait que la limite extérieure de la nébuleuse serait plus nette.

Fig. 52. — Bandes nébuleuses des étoiles des Pléiades. Photographie de l'observatoire de Yerkes du 19 octobre 1001. Un millimètre = 42,2 secondes d'arc.

La deuxième raison pour laquelle tout ne retomberait pas sur la surface de l'astre central, c'est la rotation violente qui lui a été impartie par le fait même du choc. Elle aurait

Fig. 53. — Traînée nébuleuse dans le Cygne. N. C. G. 6992. Photographie de l'observatoire de Yerkes du 5 octobre 1901. Un millimétré = 41 secondes d'arc. pour conséquence une extension en forme de disque de tout le corps principal, par suite de l'effet de

la force centrifuge. Il y aurait forcément des parties plus denses que d'autres. Des réactions moléculaires, puis des effets analogues à ceux des marées provenant de l'attraction exercée par le corps central, tendraient à égaliser partout les vitesses angulaires de rotation, de sorte que le tout tournerait comme une sphère gazeuse comprimée, et la structure en spirale disparaîtrait peu à peu. Dans les parties les plus éloignées du centre la vitesse ne croîtrait que jusqu'au point où elle serait égale à celle d'une planète circulant au même rayon. Cela veut dire que son poids serait exactement tenu en équilibre par la force centrifuge.

Aux distances les plus extrêmes du système nouveau les chocs moléculaires aussi bien que la gravitation vers le centre seraient si faibles que les masses qui se trouvent dans ces régions pourront retenir pendant des temps presque illimités, leurs formes primitives.

Au centre de ce système la masse principale serait à l'état d'un soleil vivement incandescent, mais dont la puissance lumineuse diminuerait assez rapidement, par suite de son violent rayonnement.

Dans un grand système nébuleux semblable, la gravité, par suite des énormes distances, n'agira que très faiblement, et ne produira que très lentement des effets sensibles. Il peut cependant, malgré la ténuité extrême de la matière qui le compose, surtout dans ses parties périphériques, arrêter les particules d'une pluie de poussières venant d'autres soleils, et cela précisément par suite de son étendue énorme. Pour que les gaz appartenant à la nébuleuse ne s'éloignent pas définitivement dans l'espace, échappant à la très faible action de la gravité, il faut que ses molécules soient sensiblement immobiles. En d'autres mots, la

température ne doit être que de peu de degrés supérieure au zéro absolu, 50 à 60 degrés peut-être. À ces températures extrêmement basses, Dewar a fait voir que l'adsorption joue un très grand rôle. Les petites particules poussiéreuses forment des centres, autour desquels les gaz environnants se condenseront puissamment. La très faible densité des gaz ne fait point obstacle à ce phénomène car l'adsorption suit une loi d'après laquelle la masse du gaz condensé diminuera seulement d'environ un dixième lorsque la densité du gaz environnant diminuera de 1/10 000. Il s'en suit que la masse des grains poussiéreux augmentera, et lorsqu'ils se rencontrent, ils seront liés l'un à l'autre par leurs enveloppes fluidiformes.

Il doit par conséquent se former ainsi dans ces nébuleuses une quantité relativement grande de météores, plus particulièrement dans leurs régions profondes. Or il passera dans ces régions d'autres étoiles avec leurs satellites, lesquels se trouveront plongés dans les gaz et dans les essaims météoriques de la nébuleuse. Les grands astres, ceux animés de vitesses importantes, traverseront cette matière très déliée, mais ils peuvent fort bien mettre des millions d'années à faire ces trajets, vu l'extension énorme de l'espace à parcourir.

Une photographie des plus intéressantes, due au célèbre professeur M. Wolf, de Heidelberg, est celle d'une nébuleuse du Cygne, dans laquelle a pénétré une étoile venue du dehors. En ce faisant, l'intruse a ramassé la matière tout le long de son chemin et a laissé ainsi, comme une trace de son passage, un canal vide (fig. 54). D'autres espaces, relativement débarrassés de matière nébuleuse se rencontrent très fréquemment dans les grandes nébuleuses, étendues et irrégulières. On les appelle souvent des dé-

chirures (en anglais : rifts) parce qu'elles ont la forme d'une longue traînée. Depuis longtemps l'hypothèse a été émise que ces rifts seraient les traces de grands astres qui auraient fait leur chemin à travers l'extension de la masse nébuleuse (fig. 55).

Fig. 54. — Nébuleuse et « trou noir » dans la Voie lactée, constellation du Cygne. Photographie de M. Wolf à Königstuhl, près Heidelberg.

Par contre, les corps errants plus petits et moins rapides peuvent être arrêtés par les particules composant la nébuleuse. C'est pourquoi on remarque que les régions avoisinantes sont en général moins garnies d'étoiles, tandis que celles-ci semblent s'être amassées dans l'intérieur même de la nébuleuse. Déjà Herschel avait fait cette remarque, qui tout récemment a été
Fig. 55. — Grande nébuleuse voisine de ρ du Serpentaire. Photographie de E.-E. Barnard, à l'observatoire de Lick. Dans la nébuleuse on reconnaît
plusieurs vides et « chemins » ou rifts au voisinage des grandes étoiles. l'objet de nouvelles études de Wolf et de Courvoisier. Il se crée ainsi dans la nébuleuse même une série de centres d'attraction, qui condensent les gaz environnants, et qui recueillent les météores errants, particulièrement ceux de l'intérieur.

D'autres fois, et fréquemment, on remarquera combien la matière nébuleuse est affaiblie aux alentours de quelque étoile lumineuse plongée dans le nuage. (Voy. fig. 52 et 55.) Finalement la nébuleuse se transformera en un amas d'étoiles, qui conservera les formes caractéristiques de celle-ci, parmi lesquelles
Fig. 56. — Amas d'étoiles d'Hercule (Messier 13). Photographie de l'observatoire de Yerkes. Un millimètre = 9,22 secondes d'arc.
la spirale est la plus fréquente, mais où l'on trouve aussi celle du

coin, provenant de la nébuleuse conique, et celle de la sphère. (Comp. fig. 56, 57 et 58.)

Cette évolution est exactement celle que supposait Herschel, qui se basait uniquement sur ses propres observations des nébuleuses. Il pensait toutefois que la matière s'y condensait directement en formant des étoiles, sans l'intervention d'aucun corps étranger faisant intrusion.

On sait depuis des temps immémoriaux, et il a été confirmé par les mesures prises par Herschel, et par d'autres observateurs,
Fig. 57 — Amas d'étoiles de Pégase (Messier 15). Photographie de l'observatoire de Yerkes. Un millimètre = 6,4 secondes d'arc. que les astres sont groupés très abondamment autour de la ligne moyenne de la voie lactée. Il ne semble pas improbable que primitivement une nébuleuse des plus étendues ait occupé le plan de cette voie, peut être à la suite d'une collision entre deux soleils gigantesques, comme Arcturus, par exemple. Cette énorme nébuleuse a retenu et groupé en elle les petits corps célestes qui circulaient autour d'elle et qui tous ont condensé la matière nébuleuse sur eux-mêmes. Ils sont ainsi devenus incandescents, s'ils ne l'étaient auparavant. On peut négliger le mouvement de rotation des régions très éloignées du centre de la voie lactée. Mais les astres isolés qui s'y sont formés ont à leur tour subi de nouveaux chocs, et cela expliquerait pourquoi les nébuleuses gazéiformes ainsi que les
Fig. 58. — Amas d'étoiles cunéiforme, dans les Jumeaux. amas d'étoiles sont, dans les régions de la voie lactée, des phénomènes plus fréquents qu'ailleurs.

Cette conception trouvera quelque jour sa confirmation éclatante quand on aura réussi à reconnaître un centre, (point ou

corps,) à la voie lactée. On le trouvera peut-être en déterminant la courbure de la trajectoire que suit notre soleil ou encore quelque autre étoile.

Revenons à la nébuleuse annulaire de la Lyre (fig. 50). Les mesures les plus récentes, entreprises par Newkirk, ont fourni ce résultat que l'étoile qui en forme le centre est éloigné de nous de 32 années-lumière. Comme il semble indubitable que cette étoile est bien le corps central de la nébuleuse, la distance moyenne de celle-ci est la même. Le diamètre de l'anneau étant de 1 minute d'arc, Newkirk en a conclu qu'il était distant du corps central d'environ 300 rayons d'orbite terrestres. Cette distance est à peu près dix fois celle de Neptune au soleil. À l'intérieur de l'anneau lumineux on remarque encore une faible luminosité nébuleuse. Il est probable que la matière y était jadis plus condensée que dans l'anneau extérieur. Mais elle aura été attirée et concentrée par des météores venus du dehors. Ces derniers se seront agglomérés ; il en est résulté la formation de planètes obscures, qui circulent autour du corps central et qui ont probablement absorbé la majeure partie des gaz qui les entourent.

Si le corps central avait la masse de notre propre soleil, la matière qui constitue l'anneau aurait une durée de révolution d'environ 5 000 ans. Cette rotation est suffisante pour effacer presque totalement la forme spiraloïde primitive. Il en reste cependant encore assez pour qu'on puisse nettement voir que cette spirale avait deux branches. Le corps central de la nébuleuse donne un spectre continu, avec des bandes lumineuses, qui sont très développées du côté du bleu. Il semble donc être beaucoup plus jeune et beaucoup plus chaud que notre soleil à nous. Sa puissance de radiation doit être plus intense, et peut-être la du-

rée de la rotation de l'anneau doit-elle être estimée à une durée encore bien plus grande.

M. Kapteyn, l'éminent astronome hollandais, a calculé les parallaxes de 168 nébuleuses diverses. Il a trouvé que leur distance moyenne de la terre est d'environ 700 années-lumière, c'est-à-dire à peu près celle des étoiles de dixième grandeur. Il ne semble donc pas que la vieille croyance, que les nébuleuses seraient incomparablement plus éloignées de nous que les plus faibles étoiles, soit exacte.

Les étoiles « nouvelles » forment un groupe à part parmi les étoiles variables, si remarquables à cause des changements d'intensité de leur lumière. Nous allons faire mention de quelques-unes d'entre elles, qui sont typiques, à cause du très haut intérêt scientifique qu'elles présentent. Les destinées d'une étoile qui s'introduit dans l'intérieur d'une nébuleuse déjà remplie d'autres astres immigrés, nous sont révélées par une des étoiles variables les plus curieuses, l'étoile η de la constellation d'Argus, une de celles de l'hémisphère méridional.

Cette étoile brille dans une des plus grandes nébuleuses du ciel. A-t-elle une dépendance ou relation physique quelconque avec cette nébuleuse qui semble l'entourer, nous ne pouvons pas le dire sans une investigation plus approfondie. Il se pourrait qu'elle fut située en avant de la nébuleuse, entre celle-ci et nous. Mais ses variations très fréquentes d'intensité semblent plutôt les indices d'une série de rencontres, qui paraissent très possibles, si nous admettons qu'elle se trouve à l'intérieur d'une masse nébuleuse, remplie de corps célestes aggrégés par elle.

Comme elle appartient au ciel austral, cette étoile n'a été l'objet d'aucune observation avant que les astronomes se fussent décidés à visiter l'hémisphère méridional. En 1677 on la décréta de quatrième grandeur. Dix ans plus tard elle était de deuxième puis de nouveau en 1751. En 1827 elle s'était élevée à la première grandeur et on remarqua qu'elle était variable, c'est-à-dire que sa lumière variait d'intensité.

Herschel trouva qu'elle était de première à deuxième grandeur, mais qu'en 1837 elle augmentait de clarté de telle sorte qu'en 1838 elle arrivait à la grandeur 0,2. Elle diminua ensuite jusqu'en avril 1839 où elle était de grandeur 1,1. Pendant quatre ans elle resta ainsi, puis en 1843 elle augmenta rapidement, et dépassa toutes les autres étoiles sauf Sirius, (grandeur –1,7). Sa clarté diminua ensuite lentement, pour rester tout juste visible à l'œil nu (sixième grandeur). En 1869, elle était invisible. Depuis lors elle est restée entre la sixième et la septième grandeur.

Les dernières variations d'intensité de cet astre rappellent vivement les péripéties de la Nova Persei, sauf que cette dernière a parcouru ses diverses phases lumineuses beaucoup plus rapidement. Il semble cependant certain que η d'Argus ait été au début bien plus brillante que l'étoile de Persée. Avant la grande collision de 1843 elle aura probablement subi en janvier 1838, une rencontre moins importante, dont l'effet s'est très rapidement atténué. Mais après 1843 elle a été entourée de nuages épais, de plus en plus impénétrables à sa lumière.

Peut-être la plus petite des deux collisions fut-elle de l'ordre de celle que Mayer a étudiée, et qu'il supposait produite entre soleil et terre. Il en résulterait un développement de chaleur équivalent à la dépense du soleil pendant la durée d'un siècle. Comme

η d'Argus était déjà reconnue antérieurement comme étoile variable, il se peut bien qu'elle ait subi plusieurs rencontres de ce genre.

Une observation faite à Kiew par M. Borisiak, un étudiant à l'observatoire de cette ville, indiquerait que la Nova Persei aurait atteint, dans la soirée du 21 février 1901, la grandeur 1,5. Quelques heures plus tôt elle n'était que de douzième grandeur et dès le lendemain soir de 2,7. Ensuite sa clarté a augmenté jusqu'au soir du jour suivant, où elle dépassait toutes les autres étoiles du ciel boréal. Si cette observation est exacte, la nouvelle étoile aurait subi une première petite collision, deux jours avant sa rencontre avec le deuxième soleil qui est du 23 février. Peut-être une première rencontre avec le même astre ou avec quelque satellite lui appartenant a-t-elle causé pendant un peu de temps une clarté exceptionnelle.

Les étoiles nouvelles ne sont pas aussi rares qu'on pourrait le croire. On en découvre une presque tous les ans. La plupart, de beaucoup, se montrent dans le voisinage de la voie lactée, où les étoiles visibles sont extrêmement serrées les unes près des autres, et où conséquemment une rencontre de deux astres peut se produire le plus facilement.

Des raisons analogues font qu'on trouve, dans les mêmes régions, le plus de nébuleuses gazéiformes.

Enfin c'est là aussi, dans le voisinage de la voie lactée, qu'on trouve le plus d'amas d'étoiles. C'est la conséquence immédiate du fait que des nébuleuses, qui doivent l'existence à la rencontre de deux soleils, sont bientôt traversées par des astres errants, qui

abondent relativement dans ces régions, et qui les transforment, par leur pouvoir de condensation, en amas d'étoiles.

Dans les parages du ciel où les étoiles sont relativement rares, comme par exemple dans ceux éloignés de la voie lactée, on trouve le plus grand nombre des nébuleuses ayant des spectres d'étoiles. Ce ne sont pas autre chose que de véritables amas d'étoiles, si éloignés de nous que l'on ne réussit pas à en distinguer les étoiles composantes. Si des étoiles isolées et des nébuleuses purement gazéiformes nous paraissent aussi rares dans ces régions, cela tient sans doute à leur très grand éloignement.

Parmi les étoiles variables, il en est beaucoup, qui sont extrêmement irrégulières dans leurs changements d'intensité. Elles rappellent beaucoup les étoiles nouvelles ; celle déjà citée, η d'Argus, est de ce nombre. Une autre qui fut la première reconnue pour variable, est Mira Ceti (ou l'étoile merveilleuse de la Baleine). Cet astre énigmatique fut déclaré de deuxième grandeur par le pasteur frison Fabricius, lorsqu'il le remarqua pour la première fois le 12 août 1596. Il ne l'avait pas vu antérieurement, et il le chercha en vain en octobre 1597. Mais dans le cours des années 1638 et 1639 sa variabilité fut reconnue, et l'on trouva bientôt qu'elle était fort irrégulière. Sa période est d'environ 11 mois, mais elle oscille autour de cette durée, qui est une moyenne. Lorsque son éclat est le plus fort, il semble être une étoile de première à deuxième grandeur. Parfois elle n'atteint pas cette luminosité, mais elle dépasse toujours la cinquième grandeur. Dix semaines après le maximum, l'étoile devient invisible ; son éclat diminue à ce moment jusqu'à celui d'une étoile de 9,5 grandeur. En d'autres mots, sa lumière varie à peu près comme de 1 à 1 000, peut-être même encore un peu plus. Le mi-

nimum passé, l'étoile augmente de lumière pendant un certain temps, elle redevient visible à l'œil nu, c'est-à-dire qu'elle dépasse la sixième grandeur, et six semaines plus tard elle se trouve de nouveau à son maximum. Il est évident qu'il y a dans ces variations superposition de plusieurs périodes.

Le spectre de l'étoile est très particulier. Elle appartient à la catégorie des étoiles rouges ayant un spectre à bandes, qui est mêlé à des raies brillantes de l'hydrogène. Elle s'éloigne de nous avec une vitesse qui n'est pas inférieure à 63 kilomètres par seconde. Les lignes brillantes de l'hydrogène, qui correspondent exactement à celles des nébuleuses, se dédoublent assez souvent en trois raies composantes, dont celle du milieu correspond à peu près à la vitesse moyenne, c'est-à-dire 60 kilomètres. Les deux autres prouvent qu'il existe des parties qui ont d'autres vitesses, par exemple 35 kilomètres l'une, et 82 kilomètres l'autre. Cela veut dire qu'il y a des parties qui ont, par rapport à la vitesse moyenne, 20 à 25 kilomètres en plus ou en moins. L'étoile est donc évidemment entourée de trois masses nébuleuses. L'une est concentrée autour d'un centre, les deux autres forment peut-être deux faisceaux distincts, ou mieux encore, un anneau entourant l'étoile comme la nébuleuse annulaire de la Lyre. Cet anneau tournerait autour de l'étoile avec une vitesse d'environ 23,5 km. par seconde.

Cette rotation s'effectuant dans l'espace de 11 mois, — ou plutôt de 22 mois, attendu que chaque rotation complète doit nous présenter deux maxima et deux minima —, on peut en déduire la dimension de l'anneau. Sa longueur circonférentielle doit avoir $23{,}5 \times 86\,400 \times 670 = 1\,361$ millions de kilomètres. Son rayon

sera de 217 millions de kilomètres, soit 1,45 fois celui de l'orbite terrestre.

Or la vitesse de la terre dans son orbite est de 29,5 km. par seconde. Une planète qui se trouverait à une distance du soleil 1,45 fois plus grande que celle de notre terre, aurait une vitesse 1,203 fois plus petite, c'est-à-dire de 24,5 km. par seconde. On voit combien ce chiffre est voisin de celui de l'anneau de Mira Ceti. Nous pouvons en conclure que la masse du soleil central de cet astre est très voisine de celle de notre soleil. Le calcul indiquerait que Mira serait de 8 p. 100 plus petit, mais cette différence est absolument de l'ordre des erreurs possibles.

Chandler a fait remarquer dans la variation de lumière de toutes ces étoiles un fait constant très remarquable, à savoir que, plus la durée de leur période est grande, plus l'étoile est en général rouge de couleur. Cela s'explique très aisément. Plus l'atmosphère gazeuse qui les enveloppe était dense à l'origine plus elle s'est étendue loin du corps central. De même aussi, la poussière retenue ou expulsée par elles est plus abondante. Ainsi que nous l'avons vu, le bord du soleil a une lumière rougeâtre à cause des masses poussiéreuses qui sont dispersées dans son atmosphère. La cause en est dans l'absorption de la lumière bleue par cette poussière. Il se peut cependant encore qu'elle soit rendue incandescente par le rayonnement solaire ; mais, comme elle se trouve en dehors de la sphère du soleil, sa température sera inférieure à celle de la photosphère, et sa couleur, par conséquent, relativement rouge.

Plus une nébuleuse contiendra de poussières, plus la lumière de l'étoile centrale semblera rouge. Comme la quantité de poussière augmente en général avec l'étendue de la nébuleuse, l'étoile

sera également d'autant plus rouge que les anneaux nébuleux s'étendront plus loin. Et plus cette étendue est grande, plus la durée de la rotation sera longue.

Ces étoiles que nous appelons rouges, donnent, à côté des raies spectrales claires de l'hydrogène, des spectres de bandes qui indiquent la présence de combinaisons chimiques. Ce fait était autrefois considéré comme une preuve que ces étoiles avaient une température moins élevée. Mais la même particularité s'observe dans les taches du soleil, quoique celles-ci, par suite de la place qu'elles occupent, aient une température plus élevée que celle de la photosphère environnante. La présence des bandes dans le spectre des étoiles est par contre sûrement l'indice d'une pression élevée. Les étoiles rouges sont évidemment entourées d'une atmosphère gazeuse très étendue, à l'intérieur de laquelle la pression est très forte, et où les atomes sont assez fortement comprimés, pour former des combinaisons chimiques.

Du reste, les spectres des étoiles rouges présentent des analogies frappantes avec ceux des taches solaires. La partie violette en est affaiblie par suite de la présence des masses poussiéreuses qui éteignent cette sorte de rayons. Par suite de l'importance des masses gazeuses que rencontre le rayon visuel, les lignes du spectre sont fortement élargies dans un cas comme dans l'autre. Elles sont aussi parfois accompagnées de raies brillantes.

Une autre catégorie d'étoiles qui présentent également des raies brillantes a été étudiée par Wolf et Rayet, et elles sont désignées par les noms de ces savants (voy. p. 168). Ces étoiles sont évidemment plus chaudes et plus fortement rayonnantes que les étoiles rouges. Ou bien encore, ne sont elles pas enveloppées par autant de masses poussiéreuses qui peuvent avoir été éloignées

par la très forte pression de radiation. Elles appartiennent par suite à la classe des étoiles jaunes, et non aux rouges. Bien que tout semble indiquer que les corps centraux de ces étoiles sont au moins aussi chauds que les étoiles blanches, leur couleur s'abaisse néanmoins jusqu'au jaune, par suite de la poussière qui est répandue dans leur vaste atmosphère.

On explique de la même manière une particularité très singulière des étoiles doubles, qui a été observée à plusieurs reprises par le célèbre astrophysicien Huyghens. Il a reconnu que le plus souvent, à en juger par la violence des mouvements, le plus petit des deux astres est blanc, tandis que le plus gros aurait une lumière jaune. Cela provient évidemment de ce que le plus important des corps conjugués a attiré à lui la plus grosse proportion des gaz difficilement condensables, qui faisaient partie de l'atmosphère primitive. Cette atmosphère dense qui entoure l'étoile principale est, comme celle des étoiles du type Wolf-Rayet, mélangée de poussières, ce qui gêne la marche des rayons réfrangibles, mais permet aux moins réfrangibles, les rouges, de passer plus librement. Il s'ensuit que sa lumière semble jaune à nos yeux, tandis que celle moins affaiblie du compagnon brille dans sa blancheur originale.

Les périodes irrégulières des étoiles de la classe de Mira s'expliquent aisément par l'hypothèse très vraisemblable qu'elles sont enveloppées de très près par plusieurs anneaux de poussière, comme la planète Saturne. Les anneaux intérieurs, à rotation de peu de durée, ont sans doute pu, par le grand nombre de révolutions accomplies, égaliser la répartition de cette poussière, de manière qu'on n'y trouve plus de noyau perceptible, comme on en aperçoit dans les queues des comètes. Leur seul effet est

donc de donner à l'étoile un ton rouge uniforme. Au contraire, dans les anneaux extérieurs, la répartition de la poussière reste inégale. Peut-être que l'un des anneaux, qui a le plus d'importance, influe sur la durée de la période principale. D'autres anneaux, moins importants, peuvent contribuer à déplacer quelque peu le maximum et le minimum ; la durée du temps qui s'écoule entre les deux se trouvera ainsi influencée. Pour quelques étoiles, ce déplacement de la période est si important qu'il n'a pas encore été possible de leur attribuer aucune période simple. Parmi celles-là, la plus connue est Bételgeuse, une brillante étoile rouge de la constellation d'Orion. Sa grandeur varie très irrégulièrement de 1 à 1,4.

Le plus grand nombre des étoiles variables appartiennent au type Mira Ceti. D'autres sont du type désigné par le nom de la Lyre, constellation où une étoile β en présente les particularités bien marquées. Pour plusieurs de celles-ci on a conclu de la variabilité de leurs spectres qu'elles doivent tourner autour d'un « compagnon » obscur, ou, pour parler plus exactement, qu'elles tournent avec celui-ci autour d'un centre de gravité commun. Mais de nombreuses irrégularités dans leurs périodes, et d'autres circonstances encore, indiquent que cette explication n'est pas suffisante. Il est clair que l'hypothèse de la circulation d'anneaux de poussière autour de ces étoiles, jointe à celle des centres de condensation, nous permet de nous faire une idée de la cause qui fait varier leur lumière. Elles appartiennent aux étoiles jaunes ou blanches, dans l'entourage desquelles la poussière joue un moins grand rôle que dans les étoiles du type Mira.

La période de leur variabilité est d'ailleurs bien plus courte ; elle n'est souvent que de quelques jours. La plus courte période

Fig. 59. — Spectres comparés d'étoiles de la 2, 3 et 4 catégorie. Photographie de l'observatoire de Yerkes. Partie bleue du spectre.
Les longueurs d'ondes sont indiquées en millionièmes de millimètre.
AAAAAA. 280 du Cat. Schjellerup.AA280 du Cat. Schjellerup. 4 catégorie.
AAAABB. 280 du Cat. Schjellerup.AALe Soleil. 2 catégorie.
AAAACC. 280 du Cat. Schjellerup.AAμ des Gémeaux. 3 catégorie.
AAAADD. 280 du Cat. Schjellerup.AA74 du Cat. Schjellerup. 4 catégorie.
n'est que de 4 heures. Celle des étoiles du type Mira est au contraire de 65 jours au moins, et elle atteint jusqu'à 2 ans. Il se peut qu'il en existe à périodes plus longues encore ; elles n'ont pas été étudiées jusqu'à présent.

Àcôté des étoiles du type de la Lyre, il y a celles du type Algol dont on peut expliquer la variabilité par l'hypothèse qu'un autre corps lumineux ou obscur se trouve dans leur voisinage et nous enlève de loin en loin une partie de leur lumière. Dans ce cas, il n'est pour ainsi dire plus question de poussières. Les spectres de ces étoiles appartiennent à la première catégorie, c'est-à-dire des étoiles blanches, au moins celles qui ont été étudiées.

Il nous faut admettre pour toutes les étoiles variables que la ligne visuelle qui les relie à leur observateur passe par le plan écliptique de leurs anneaux de poussière, ou encore par celui de leurs compagnons. Si tel n'est pas le cas, elles devraient nous apparaître comme des nébuleuses à condensation centrale, ou encore, s'il s'agit d'étoiles du type Algol, comme les étoiles doubles

dites « spectroscopiques » dont le mouvement de rotation est prouvé par le déplacement des raies du spectre.

L'évolution des étoiles à partir de l'état de nébuleuse est l'objet des études du célèbre directeur de l'observatoire de Lick (Californie), M. W. W. Campbell. Il décrit cette évolution dans les termes suivants.

« Il n'est pas difficile de citer toute une série d'étoiles bien connues, dont l'état actuel ne diffère guère de celui des nébuleuses. Leurs spectres contiennent les raies brillantes de l'hydrogène aussi bien que de l'hélium, γ d'Argus et ζ de la Poupe appartiennent à cette catégorie. Une autre étoile, qu'il faut également classer parmi elles (D. M + 30°,3639), est entourée d'une atmosphère d'hydrogène dont le diamètre est d'environ 5 secondes d'arc. D'autres semblent un peu plus éloignées de l'état de nébuleuses, en ce qu'elles donnent pour l'hydrogène des raies claires aussi bien que des raies obscures. On les observe donc précisément au moment où elles semblent en voie du remplacement des raies claires par des raies obscures. γ de Cassiopée, Pleione et μ du Centaure en sont des exemples.

« Les étoiles à hélium sont apparentées de près aux précédentes. Elles ont les raies obscures de l'hydrogène, une vingtaine de raies de l'hélium, enfin quelques faibles raies de métaux. Les étoiles blanches d'Orion et des Pléiades sont typiques de cette catégorie.

« L'étude spectroscopique de ces étoiles a démontré la probabilité qu'elles se trouvent dans une période peu avancée de leur évolution. La photographie a révélé l'existence de masses nébuleuses dans le voisinage immédiat de ces étoiles à raies

Fig. 60. — Spectres comparés d'étoiles de la 2, 3 et 4 catégorie. Photographie de l'observatoire de Yerkes. Partie verte et jaune du spectre.
Les longueurs d'ondes sont indiquées en millionièmes de millimètre.
AAAAAA. 280 du Cat. Schjellerup.AA280 du Cat. Schjellerup. 4 catégorie.
AAAABB. 280 du Cat. Schjellerup.AALe Soleil. 2 catégorie.
AAAACC. 280 du Cat. Schjellerup.AAμ des Gémeaux. 3 catégorie.
AAAADD. 280 du Cat. Schjellerup.AA74 du Cat. Schjellerup. 4 catégorie.
brillantes, et de celles à hélium. Cette découverte a confirmé leur jeunesse d'une façon éclatante. Peut-on, après avoir examiné la nébuleuse qui se détache du fond de la constellation d'Orion (fig. 51), ou encore les restes de matière nébuleuse qui enveloppent les étoiles des Pléiades (fig. 52), peut-on douter que ces groupes stellaires soient d'origine récente ?

« Dans le cours des temps, la chaleur stellaire rayonne vers l'espace, et elle est perdue pour l'étoile elle-même. D'autre part la contraction fait croître l'attraction de gravité à leur surface. Certaines raies de l'hydrogène, découvertes par Pickering, disparaissent, les raies ordinaires deviennent plus nettes, — toutes comme raies sombres. Celles appartenant à l'hélium deviennent indistinctes, tandis que d'autres raies, — obscures encore, — du calcium et du fer se montrent.

« Véga et Sirius sont des étoiles types de ce degré d'évolution. À mesure que les étoiles vieillissent, l'intensité des raies de l'hydrogène diminue, celles du calcium et des métaux deviennent plus nettes, la couleur blanc-bleuâtre passe au jaune, et, après

que plusieurs états bien connus ont été parcourus, on arrive à l'état qui se manifeste sur notre soleil. Dans les spectres de ces étoiles, l'hydrogène n'est plus indiqué que par 4 ou 5 raies d'intensité modérée, les raies de l'hélium manquent, les raies du calcium sont très frappantes et on trouve jusqu'à 20 000 raies métalliques. Les étoiles du type solaire semblent se trouver bien près du maximum d'intensité de l'évolution stellaire. La température moyenne de ces étoiles doit aussi être bien près de son maximum, car leur faible densité indique un état gazéiforme de la matière qui les compose (comp. le chapitre VII).

« Avec le temps, la température s'abaisse. La couleur de l'étoile passe du jaune au rouge, par suite d'une absorption plus grande de la lumière par leur atmosphère. Les raies de l'hydrogène deviennent tout à fait indistinctes, les raies métalliques se précisent, et de larges bandes d'absorption se montrent. Dans une certaine catégorie (type III de Secchi) à laquelle appartient α d'Hercule, l'origine de ces bandes reste inexpliquée. Dans une autre catégorie (type IV de Secchi) représentée par 19 des Poissons, on les a définitivement reconnues comme appartenant à des combinaisons de carbone.

« Il ne peut guère y avoir de doute que cette dernière sorte d'étoiles du type IV approche de la dernière phase de son évolution. La température de leurs parties périphériques est tombée assez bas pour que des combinaisons chimiques puissent s'y former, tout comme aux bords extérieurs de notre soleil.

« Le type III de Secchi comprend quelques centaines d'étoiles, du genre Mira Ceti, ayant des variations d'intensité de longue période. Quand ces étoiles brillent avec le plus d'intensité elles donnent diverses raies brillantes d'hydrogène ainsi que d'autres

éléments chimiques. Il est très remarquable que les étoiles rouge foncé sont toutes très faibles (type IV de Secchi). Aucune ne dépasse la grandeur 5,5. Leur pouvoir rayonnant est indubitablement très faible. »

La phase évolutionnaire qui suit celle correspondant au type IV de Secchi nous est connue par des exemples que nous avons sous les yeux. Ce sont ceux de la planète Jupiter, et de notre propre globe. Ces deux astres seraient invisibles s'ils ne brillaient pas d'un éclat emprunté.

Jupiter n'est pas aussi avancé dans son évolution que la terre. Sa densité est un peu plus faible que celle du soleil, 1,27 au lieu de 1,38. Il est probable qu'il est absolument gazeux, abstraction faite des nuages de son atmosphère. La terre, au contraire, dont la densité moyenne est de 5,52, a une croûte solide, qui enferme sa partie centrale incandescente. C'est cet état qui correspond à l'évolution finale du soleil.

Lorsqu'une rencontre s'est produite entre deux étoiles, les masses gazeuses expulsées se condensent en premier lieu en tant que gaz métalliques, par suite d'un refroidissement rapide. L'hélium et l'hydrogène seuls restent gazeux, en formant des masses nébuleuses autour du corps central. Ces masses nébuleuses nous montrent des raies lumineuses. Leur luminosité repose sur les particules chargées d'électricité négative qui leur sont envoyées par suite de la pression de radiation des étoiles voisines, mais plus particulièrement par le corps central lui-même. Dans les étoiles nouvelles observées jusqu'à ce jour, cette pression de radiation s'abaisse rapidement, et la lumière émanée de la nébuleuse disparaît très rapidement. Dans d'autres cas, au contraire, comme pour les étoiles à raies très brillantes d'hélium et d'hydro-

gène, la radiation du corps central ou de quelques étoiles voisines semble se conserver très longtemps.

Les agglomérations nébuliformes d'hélium et d'hydrogène se dissipent graduellement, et elles se condensent avec formation de combinaisons « explosives » dans des étoiles voisines. C'est l'hélium qui semble avoir le plus d'affinité pour la formation de combinaisons. Il disparaît le premier des atmosphères stellaires. Il semble, en effet, résulter des expériences de Ramsay, de Cooke et de Kohlschütter, qu'à des températures élevées, l'hélium peut entrer dans des combinaisons chimiques.

En second lieu, l'hydrogène est absorbé à son tour. La lumière du corps central manifeste alors la prépondérance des vapeurs du calcium et d'autres métaux dans son atmosphère. En même temps on constate l'existence de combinaisons chimiques, parmi lesquelles celles du carbone jouent un rôle capital. On les reconnaît, en effet, dans les parties extérieures des taches solaires, dans les étoiles du type IV, et enfin dans les enveloppes gazeuses des comètes.

La dernière phase est celle de la formation d'une croûte solide. L'étoile est éteinte.

07

Nous allons examiner maintenant de plus près quelles sont les conditions chimiques et physiques qui, selon les probabilités, caractérisent les nébuleuses, et qui les différencient des soleils. Ces conditions sont, sous bien des rapports, très différentes de celles

que nous sommes habitués à reconnaître à la matière, relativement très condensée, que nous étudions sur la terre.

On s'aperçoit combien cette différence doit être grande en constatant que le principe de Clausius, qui représente la somme de nos connaissances sur la nature de la chaleur, ne doit pas pouvoir s'appliquer aux nébuleuses. Ce principe s'énonce comme suit :

« L'énergie de l'univers est constante. L'entropie de l'univers tend vers un maximum. »

Tout le monde sait sans doute aujourd'hui ce que l'on entend par énergie. Elle existe sous bien des formes. Les principales d'entre elles sont : l'énergie due à la position, — un corps pesant contient plus d'énergie quand il a été soulevé à une certaine hauteur du sol, que lorsqu'il repose sur celui-ci ; l'énergie due au mouvement, — un projectile possède une énergie qui est proportionnelle à sa masse et au carré de sa vitesse ; l'énergie calorifique, — on la considère comme l'énergie de mouvement des plus petites particules constitutives d'un corps ; l'énergie électrique, — elle peut être rassemblée dans une batterie d'accumulateurs et transformée, comme toutes les autres, en énergie calorifique. Enfin il y a l'énergie chimique : celle ci se manifeste, par exemple, lorsqu'on fait un mélange de 8 grammes d'oxygène et de 1 gramme d'hydrogène, qui se combineront avec une grande production de chaleur, en donnant de l'eau.

Quand nous disons que l'énergie d'un système, auquel il n'est fait aucun apport extérieur d'énergie nouvelle, reste constante, cela signifie seulement que les divers genres d'énergie qui se trouvent contenus dans les parties constituantes de ce système,

peuvent se transformer en d'autres sortes d'énergie, mais que leur somme n'en reste pas moins invariable.

Clausius a étendu l'application de son principe à l'univers dans toute son infinité.

On entend par entropie la quantité de chaleur contenue dans un corps, divisée par son degré absolu de température. Si par conséquent une quantité donnée de chaleur, — Q calories, — passe d'un corps qui est à 100 degrés C et dont la température absolue est de 373 degrés, à un autre corps qui est à 0 degrés, — température absolue 273 degrés, — l'entropie des deux corps réunis diminue de Q373, et augmente en même temps de Q273. Cette dernière quantité étant la plus grande des deux, l'entropie se trouve avoir augmenté.

Or, nous savons que la chaleur a invariablement une tendance « par elle-même » de passer d'un corps plus chaud à un corps moins chaud, soit par conductibilité, soit par radiation. L'entropie augmente évidemment par ce transfert. C'est là une preuve de l'exactitude du principe de Clausius, que l'entropie a une tendance à augmenter.

Le cas le plus simple d'un équilibre de température se produira si nous plaçons dans un espace qui n'admet aucune accession de chaleur de l'extérieur, et d'où aucune chaleur ne peut non plus sortir, un certain nombre de corps d'inégale température. La chaleur y passera des corps plus chauds aux corps moins chauds par un moyen quelconque, par conductibilité ou par rayonnement, jusqu'à ce que tous arrivent à une même température. L'équilibre s'établira. C'est à un semblable équilibre que tend, selon Clausius, l'ensemble de l'univers. Si jamais il se produit, toutes les

sources du mouvement seront taries. La vie cessera. C'est la « mort calorifique » (Wärmetod) qui régnera.

Mais si les vues de Clausius étaient exactes, cette mort calorifique devrait déjà s'être établie depuis les temps infinis que le monde existe, — ce qui n'est absolument pas le cas. Ou bien encore, pourra-t-on dire, l'existence du monde n'est pas infinie, mais il y a eu un commencement. Cela serait contraire à la première partie du principe de Clausius qui dit : l'énergie totale du monde est constante, — à moins toutefois que toute énergie existante ait eu une subite origine à l'instant même de la création. Cela nous est totalement incompréhensible, et nous sommes réduits à chercher s'il existe des conditions où le principe de Clausius sur l'entropie ne serait pas applicable.

Le célèbre physicien écossais Maxwell a imaginé un cas de ce genre, que voici. Supposons qu'un récipient donné soit rempli d'un gaz de température égale dans toutes ses parties. Il est séparé en deux espaces intérieurs par une cloison. Dans cette cloison, il a été pratiqué une série de très petites ouvertures telles qu'une seule molécule gazeuse puisse la traverser à la fois. Chaque ouverture est supposée soumise à la garde d'un petit être intelligent, qui a pour fonction de laisser passer dans un sens toutes les molécules animées d'une vitesse plus grande que la vitesse moyenne de la totalité. Par contre, toutes celles dont la vitesse est inférieure à cette moyenne, ne sont admises que dans l'autre sens. Une soupape empêche le passage de toutes celles qui ne répondent pas à ces conditions. Il arrivera donc que toutes les molécules animées d'une grande vitesse seront réunies dans l'un des compartiments, toutes celles à vitesse faible se trouveront dans l'autre. — En d'autres mots, il passe de la chaleur (car c'est en

cela que consiste le mouvement des molécules) d'un des côtés, qui se refroidira constamment, à l'autre côté qui se réchauffera d'une façon continue. Il est évident que celui-ci sera plus chaud que le premier.

Dans ce cas, donc, il passerait de la chaleur d'un corps froid à un corps plus chaud : l'entropie diminue.

Or, il n'existe naturellement aucun être intelligent de cette sorte dans la nature. Un cas analogue ne s'en présente pas moins dans les corps célestes à forme gazeuse. Quand les molécules du gaz qui constitue l'atmosphère d'un corps céleste ont une vitesse suffisante, — cette vitesse est de 11 kilomètres par seconde pour notre globe, — et que, se trouvant dans les couches extérieures de ce gaz, elles se dirigent vers l'espace, elles échappent à sa sphère d'attraction, et elles continuent leur chemin vers l'espace infini. Telle une comète qui, arrivée au périhélie, conserve une vitesse suffisante pour s'échapper forcément du système solaire. C'est de cette façon que, selon l'opinion de Stoney, la lune a perdu son atmosphère primitive. Cette perte de gaz est, sans doute, insensible pour le soleil et pour des planètes ayant l'importance de notre terre. Elle pourrait jouer au contraire un rôle des plus importants dans l'économie des nébuleuses, où toute radiation venant des astres chauds est emmagasinée et où, en raison des énormes distances, la gravité est extrêmement faible. C'est ainsi que les nébuleuses perdent, par leurs parties périphériques, les molécules animées des plus grandes vitesses, ce qui en refroidit les couches les plus éloignées du centre.

Si, dans l'univers immense, il n'existait que des nébuleuses de cette sorte, les molécules détachées iraient en fin de compte s'échouer dans quelque autre nébuleuse ; il s'établirait un équi-

libre de température de l'une à l'autre et la « mort calorifique » deviendrait une réalité. Seulement, comme nous l'avons déjà fait observer, il existe, dans les nébuleuses, de nombreux corps immigrés, qui ont condensé les gaz autour d'eux et qui ont, par suite, atteint une température supérieure.

Des molécules errantes de gaz peuvent encore parvenir à l'atmosphère très étendue de ces étoiles à grande croissance, ce qui aura pour effet d'accélérer la condensation, accompagnée d'une constante diminution de l'entropie. C'est par de semblables réactions que le mécanisme de l'univers peut être maintenu en mouvement constant sans jamais s'arrêter.

C'est autour des corps immigrés dans les nébuleuses et autour des restes de l'étoile nouvelle qui se trouvent à son centre que les gaz se rassembleront, après avoir été primitivement disséminés dans les parties extérieures de la nébuleuse. Ces gaz ont leur origine dans les matières explosives qui se trouvaient à l'intérieur de l'étoile nouvelle. Les principaux d'entre eux sont, sans nul doute, l'hélium et l'hydrogène, car ce sont les moins facilement condensables. Ils peuvent aussi exister en quantité notable aux températures les plus basses, comme le sont celles des parties les plus éloignées de la nébuleuse. Les autres gaz doivent, au contraire, y avoir subi une condensation.

Àsupposer que la température absolue de la nébuleuse fût de 50 degrés (–220° C), la vapeur du plus volatil d'entre les métaux, le mercure, serait, même à l'état saturé, si peu dense, qu'un seul gramme en occuperait un cube dont le côté correspondrait à environ 2 000 années-lumière. Cela représente 450 fois la distance de la terre à l'étoile fixe la plus proche. Pour le sodium, que nous considérons aussi comme un métal très volatil, et qui joue un rôle

considérable dans la constitution des étoiles, le côté du cube contenant un gramme serait encore d'environ un milliard de fois plus grand.

Le fer et le magnésium que l'on trouve fréquemment aussi dans les étoiles fixes, et qui sont moins volatils que les deux précédents métaux, nous donneraient des chiffres encore beaucoup moins concevables.

Ce qui précède nous fait comprendre combien sont puissantes les basses températures pour faire le départ de tout ce qui n'est pas aussi réfractaire à la condensation que l'hélium et l'hydrogène. Mais nous savons encore qu'il existe dans les nébuleuses un autre élément, auquel on a donné le nom de nébulium, qui est caractérisé par deux raies spectrales très caractéristiques, inconnues pour tous les corps existant sur notre globe. Il faut en conclure que cet élément, complètement inconnu, doit être aussi peu susceptible de liquéfaction que l'hydrogène ou l'hélium. Son point d'ébullition, comme celui de ces deux gaz, est sans doute inférieur à 50 degrés de température absolue.

Si donc l'hydrogène, l'hélium et le nébulium nous semblent seuls présents dans les nébuleuses très étendues, cela ne provient sans doute uniquement que de leur très bas point d'ébullition. Une supposition, qui a été faite, que tous les corps se résolvent en hydrogène et en hélium, lorsqu'ils se trouvent dans un état de diffusion extrême (hypothèse de Lockyer) ne repose sur aucune preuve.

Les couches plus profondes des masses nébuleuses qui se rapprochent davantage de la forme d'un disque, recèlent probablement d'autres corps peu condensables. Tels sont l'azote, des hy-

drocarbures en combinaisons très simples, l'oxyde de carbone, etc. Plus près encore du centre, du sodium, du magnésium et même du fer, tous ces corps étant à l'état gazeux. Ces éléments constituants existent dans les couches extérieures, mais sous forme de poussières, ce qui empêche que leur spectre soit visible. Dans les nébuleuses en spirale très développées, les couches extérieures, qui cachent le corps central, sont sans doute extrêmement raréfiées, en sorte que la poussière qui y flotte ne parvient pas à cacher le spectre des gaz métalliques. Dans ce cas, le spectre de la nébuleuse ressemble à un spectre d'étoile, en ce que les couches profondes contiennent des nuages de poussières incandescentes dont la lumière est tamisée par les masses gazeuses environnantes.

On a fait cette remarque que les diverses raies du spectre des nébuleuses n'ont pas partout la même largeur dans toute l'étendue de la région occupée par l'astre. Ainsi Campbell, en examinant une petite nébuleuse planétaire qui se trouve dans le voisinage de la grande nébuleuse d'Orion, remarqua que le nébulium n'y avait pas la même extension que l'hydrogène. Ce nébulium, qui se trouvait concentré au centre de la nébuleuse, aurait donc un point d'ébullition plus élevé que l'hydrogène. Il se trouve, à cause de cela, en quantités notables dans les parties intérieures, chaudes, de la nébuleuse. D'autres investigations de cette sorte nous feront sans doute voir plus clair dans les conditions de température de ces remarquables objets de l'univers stellaire.

Ritter et Lane ont fait des calculs intéressants sur les conditions d'équilibre où peut se trouver un astre gazéiforme ayant une densité assez faible pour que les lois des gaz puissent y trouver leur application. Cela n'est admissible que pour des gaz ou

pour des mélanges gazeux dont la densité ne dépasse pas 1/10 de celle de l'eau, ou 1/14 de la densité actuelle du soleil. Dans une semblable masse gazeuse, la pression des régions centrales sera naturellement plus forte que dans les régions périphériques, par la même raison qui fait que la densité de notre atmosphère diminue à mesure qu'on s'élève.

Or, supposons qu'une certaine masse d'air soit transportée, dans notre atmosphère, à 1 000 mètres de hauteur, son volume s'agrandira, et sa température s'abaissera de 9°,8. S'il se produisait dans les masses atmosphériques des mouvements d'une grande violence dans le sens vertical, ce qu'on appelle souvent de la convection, leur température varierait, suivant cette loi, avec la hauteur. Mais le rayonnement calorifique de la terre a pour effet d'équilibrer les variations de température qui se produiraient. Le calcul suivant, dû à Schuster, sur les conditions d'une masse gazeuse ayant la grandeur du soleil, est basé sur les recherches de Ritter.

Le calcul part de cette hypothèse, que les conditions calorifiques de la masse gazeuse ne dépendent que du mouvement des gaz et non du rayonnement. Il s'applique à un astre qui aurait une masse égale à celle de notre soleil (1,9×10 grammes ou 324 000 fois celle de la terre) et un rayon égal à 10 fois celui du soleil (10 × 690 000 kilomètres). Sa densité moyenne serait donc 1 000 fois plus faible que celle du soleil (0,0014 fois la densité de l'eau à 4° C).

Les résultats de ce calcul sont résumés dans le tableau ci-dessous. La première colonne indique, de dixième en dixième du rayon, la distance au centre de la couche considérée. La densité de la couche, que donne la deuxième colonne, est évaluée par

rapport à celle de l'eau = 1. La troisième colonne exprime la pression en milliers d'atmosphères. La température est indiquée (col. 4 et 5) en milliers de degrés centigrades. Elle varie proportionnellement au poids atomique du gaz dont l'astre est composé. Les chiffres de la quatrième colonne se rapportent à un gaz dont le poids moléculaire est l'unité : c'est celle de l'hydrogène dissocié en atomes, tel qu'il existe indubitablement dans le soleil et dans les étoiles. Si ensuite on suppose que l'astre ne comprend que du fer, les chiffres de la quatrième colonne doivent être multipliés par le poids atomique du fer, c'est-à-dire 56. On obtient ainsi les chiffres de la cinquième colonne.

Le calcul de Schuster a en réalité été fait pour le soleil, c'est-à-dire pour un globe dont le diamètre est 10 fois plus petit, et dont la densité est par conséquent 1 000 fois plus grande que les chiffres donnés ci-dessus. D'après la loi de la gravitation et celles des gaz, la pression serait alors 10 000 fois plus grande et la température 10 fois plus élevée que ne l'indiquent les chiffres du tableau. Mais alors la densité des parties centrales devient beaucoup trop élevée pour que les lois qui régissent les gaz puissent encore trouver leur application. J'ai donc préféré modifier le calcul de telle manière que ses résultats s'appliquent à un corps dont le rayon est 10 fois celui du soleil, ou 1 080 fois celui de la terre. Il occuperait la 22 partie du rayon de l'orbite terrestre. Ce serait donc encore un astre dont l'étendue, comparée à celle des nébuleuses, serait relativement très petite.

Ce qui frappe, c'est la pression extraordinairement élevée qui se produira dans les parties intérieures du globe, ce qui tient à la masse considérable de l'ensemble et aux distances relativement réduites. Au centre de notre soleil, la pression serait d'environ

8 520 millions d'atmosphères, car elle varie en raison inverse de la quatrième puissance du diamètre. La pression effective au centre du soleil est en effet presque de cet ordre de grandeur. Si cet astre s'étendait de manière à former une nébuleuse planétaire ayant 1 000 fois ses dimensions linéaires actuelles, ce qui veut dire qu'il remplirait à peu près l'orbite de Jupiter, son poids spécifique au centre diminuerait au millionième de la valeur indiquée ci-dessus. Cela veut dire qu'au point de cette nébuleuse où la matière se trouverait à l'état de plus forte concentration, elle ne serait quand même pas plus dense que dans les tubes où nos instruments ont fait le vide avec le plus de soin, à la température ordinaire.

La pression serait également très diminuée. Elle ne serait plus que de 6 millimètres au centre de la masse gazeuse. Par contre, la température serait encore très élevée en ce même point, savoir : 24 600 degrés si la nébuleuse était formée d'hydrogène à l'état atomique, et 56 fois plus si elle était constituée par du fer à l'état de gaz. Une semblable nébuleuse ne retiendrait des gaz qu'avec une force égale à 1,6 fois celle de la terre. Des molécules gazeuses qui auraient un mouvement centrifuge d'environ 18 kilomètres de vitesse s'échapperaient pour toujours de son atmosphère.

Le calcul des températures dans des masses gazeuses de ce genre est quelque peu incertain. On suppose, en effet, que la radiation et la conductibilité à la chaleur ne produisent point d'effet particulièrement sensible. Cela est probablement vrai en ce qui concerne la conductibilité, mais la radiation n'est pas aussi négligeable. Il s'ensuivrait que les températures intérieures seraient plus faibles que ne l'indique le calcul. Il est toutefois très difficile d'apprécier l'importance de ce facteur.

Supposons que la masse du corps céleste considéré soit différente de celle qui a été prise pour base ci-dessus, et qu'elle soit, par exemple, le double. Il suffira de changer la pression et la densité dans la même proportion. La température ne changera pas. Nous avons donc ainsi la possibilité de nous faire une idée de l'état d'une nébuleuse, quelle que soit son étendue ou sa masse.

Lane a prouvé, et nous avons indiqué, à propos des calculs ci-dessus, que la température d'une nébuleuse, comme celle que nous avons considérée, augmente, si, par suite de perte de chaleur, elle se rétrécit et se condense. Lui parvient-il, au contraire, de la chaleur d'une source extérieure, elle se dilatera et sa température diminuera. Il est probable qu'un astre de cette sorte perd de la chaleur et augmente graduellement sa température jusqu'à ce qu'il se transforme en une étoile ayant tout d'abord une forte atmosphère d'hélium et d'hydrogène, comme dans les étoiles les plus jeunes, à lumière blanche. Petit à petit, à mesure de l'élévation de la température, les combinaisons chimiques d'une énergie extraordinaire, qui caractérisent l'intérieur du soleil, parviennent à se former. L'hélium et l'hydrogène, libérés lors de la formation de la nébuleuse et projetés dans l'espace, se diffuseront de nouveau dans l'intérieur de l'étoile, où ils seront fixés par la formation des dites combinaisons.

La puissante atmosphère d'hydrogène et d'hélium disparaît alors, — l'hélium en premier lieu —, l'étoile se contracte de plus en plus, la pression s'élève énormément, et les courants gazeux de convection s'accroissent de même. Il se fait dans l'atmosphère de l'étoile une grande production de nuages, et elle arrive enfin à présenter les caractéristiques de notre soleil.

Celui-ci se comporte tout autrement que les nébuleuses gazeuses auxquelles s'appliquent les calculs de Lane, de Ritter, et de Schuster. Quand, en effet, la contraction des gaz est parvenue à un certain degré, la pression s'élève dans la proportion de 1 à 16, tandis que le volume diminue dans celle de 8 à 1, si, pendant ce temps, la température ne change pas. Lorsque le gaz a atteint ce point, et qu'il continue à se comprimer, la température reste constamment en équilibre. La pression s'élève-t-elle encore, la température s'abaissera, afin que l'équilibre puisse continuer à subsister. D'après les recherches d'Amagat, cela se produit vers 17 degrés dans les gaz qui, à cette température, sont bien au dessus de leur point critique, tels que l'hydrogène et l'azote, et sous une pression de 300 et de 250 atmosphères. À une température double (307° C), il faut une pression sensiblement double, et ainsi de suite.

Nous pouvons maintenant appliquer à notre nébuleuse le calcul qui nous dira quand elle traversera ce moment critique, qui doit être suivi d'une chute de température. En partant des mêmes chiffres que ci-dessus, on trouvera que la moitié de la masse de la nébuleuse occupera une sphère dont le rayon sera les 0,53 de celui de la nébuleuse. Si la masse avait partout la même densité, cette moitié occuperait un volume sphérique ayant les 0,84 de ce rayon.

Quand la masse intérieure dépassera-t-elle cet état limite, la partie extérieure restant encore en deçà de lui ? Cela arrivera à peu près au moment où la nébuleuse passera en totalité par sa température maxima. Prenons les températures qui correspondent au fer réduit à l'état de gaz, car, à l'intérieur de la nébuleuse, le poids atomique moyen doit bien correspondre au moins

à 56 qui est celui du fer. Nous trouverons qu'à la distance de 0,53 rayons (du centre) la pression doit être d'environ 177 000 atmosphères et la température de 71 millions de degrés, c'est-à-dire 245 000 fois plus grande que la température absolue (290°) de l'expérience d'Amagat. L'état en question ne serait donc atteint lorsque la pression serait 245 000 fois plus grande que 250 atmosphères, c'est-à-dire sous 61 millions d'atmosphères. Mais, comme elle n'est que de 177 000 atmosphères, la nébuleuse sera encore très éloignée de la phase où le refroidissement doit commencer.

On peut facilement se rendre compte par le calcul, que cela aura lieu quand la nébuleuse se sera contractée à un volume approximativement égal à trois fois celui de notre soleil. L'affirmation souvent produite que le soleil atteindra peut-être bien dans l'avenir une température beaucoup plus élevée n'est donc pas défendable. Il a depuis longtemps dépassé le moment où le point culminant de la variation de sa température a été atteint. Il est actuellement en voie de refroidissement. Les températures calculées par Schuster étant sans doute beaucoup trop élevées, le refroidissement doit même avoir commencé sensiblement plus tôt. Mais des étoiles comme Sirius, dont la densité n'est vraisemblablement pas plus grande que le centième de celle du soleil, sont sans doute encore dans la période de l'accroissement de leur température. L'état actuel de ces étoiles correspond à peu près à celui de la masse gazeuse qui nous a servi plus haut à éclairer la discussion.

Les nébuleuses planétaires sont encore infiniment plus volumineuses. Les dimensions colossales qu'elles ont parfois deviennent évidentes quand on considère que la principale d'entre

elles, qui porte le n 5 dans le catalogue d'Herschel, et qui est située près de l'étoile B de la Grande Ourse, a un diamètre de 2,67 minutes d'arc. Si elle était aussi proche de nous que l'étoile fixe la plus rapprochée, ce diamètre serait trois fois celui de l'orbite de Neptune. Il est probablement encore une centaine de fois plus grand. Cela nous donne une idée de la raréfaction extrême d'une semblable formation. Là où la densité y est la plus grande, elle ne dépasse probablement pas la billionième partie de celle de l'air. Dans les régions périphériques de ces nébuleuses, la température doit être extrêmement basse, autrement elles ne sauraient rester agglomérées. C'est pourquoi l'hydrogène et l'hélium gazeux peuvent seuls y exister.

Nous pouvons néanmoins considérer la densité et la température de ces astres comme énormes en comparaison avec celles des gaz contenus dans les spirales des nébuleuses. Là, l'équilibre n'existe jamais, et ce n'est que par suite de l'extraordinaire petitesse des forces agissantes que dans ces agglomérations la forme peut être maintenue pendant longtemps, sans changement appréciable. C'est probablement dans ces régions que les masses de poussières cosmiques sont arrêtées dans leurs mouvements, et que par leur agglomération elles forment des météorites et des comètes. Celles-ci s'enfoncent ensuite dans les parties plus centrales de la nébuleuse, où elles pénètrent très profondément par suite de leur masse relativement grande, pour y constituer les noyaux pour la formation des planètes et des satellites. Elles acquièrent graduellement, par leurs rencontres avec les masses gazeuses, leur mouvement rotatoire autour de l'axe de rotation de la nébuleuse. Elles condensent en même temps à leur surface une partie de ces masses gazeuses, et acquièrent ainsi une température élevée, que la radiation leur fait perdre à son tour, assez vite.

Autant qu'on le sait aujourd'hui, les nébuleuses à spirale se caractérisent par un spectre continu. L'éclat des étoiles qu'elles contiennent dépasse complètement la faible lumière des masses nébuleuses. Il est hors de doute que ces étoiles, provenant de condensation, sont dans une phase très primitive de leur existence, et correspondent par conséquent aux étoiles blanches, comme la Nova Persei et comme l'étoile centrale dans la nébuleuse annulaire de la Lyre. On a cependant reconnu que le spectre de la nébuleuse d'Andromède a sensiblement la même étendue que celui des étoiles jaunes. Peut-être cela provient-il de ce que la lumière des étoiles que contient cette nébuleuse, qui se présente à nous de côté, est en partie éteinte par des poussières situées à sa périphérie, ainsi que ce fut le cas pour la Nova Persei, lors de sa période de luminosité variable.

Nos considérations nous conduisent donc à cette conclusion que les corps centraux des nébuleuses sont entourés d'une masse gazeuse énorme, qui est en général en rotation autour de son axe. En dehors d'elle les autres centres de condensation tournent également autour du corps central en entraînant avec eux les masses gazeuses qui s'y sont condensées. Le frottement de ces masses adventives et de la masse gazeuse primitive, qui circule dans le plan équatorial du corps central, a fait qu'elles se sont peu à peu approchées de ce plan, peu différent du plan de l'écliptique. Nous obtenons ainsi un véritable système planétaire, où les planètes sont entourées de masses gazeuses énormes, comme les étoiles des Pléiades (fig. 52).

Si maintenant, comme dans notre système solaire, les planètes ont, comparativement au corps central, une faible masse, elles vont se refroidir infiniment plus vite que lui. Leurs masses ga-

zeuses se contracteront rapidement. Leur durée de rotation se raccourcira de même. Celle-ci était probablement, au début, peu différente de celle du corps central, tout au moins pour les planètes peu éloignées du centre. Par suite de la très grande étendue du corps central, les planètes qui errent autour de lui y produiront des effets de marées très considérables. Sa vitesse de rotation diminue, et la durée de la rotation des planètes tend à s'allonger. De là un défaut d'équilibre, mais qui disparaît, la planète étant en quelque sorte enlevée au soleil, comme G.-H. Darwin l'a si intelligemment fait voir à propos des relations de notre satellite à la terre.

Des conditions analogues se retrouvent dans l'entourage des planètes qui acquièrent, parmi même procédé, leurs satellites. C'est aussi cette même évolution qui explique la remarquable coïncidence que toutes les planètes se meuvent à peu près dans le même plan, que nous appelons l'écliptique, et que leurs orbites sont presque circulaires. Les planètes les plus éloignées font seules une exception, ayant été moins influencées par les marées ; tels sont Uranus et Neptune.

Pour expliquer ces phénomènes, divers savants et astronomes ont émis une hypothèse qui a été appelée du nom de ses principaux défenseurs, la théorie de Kant et de Laplace. Déjà Swedenborg (1734) avait donné quelques indications dans ce sens. Il admit que notre système était sorti du chaos, — chaos solare —, par la formation de tourbillons, qui, sous l'influence de forces intérieures, analogues à des forces magnétiques, auraient imprimé à l'ensemble un mouvement de rotation toujours croissant autour du soleil. Un anneau aurait fini par se détacher à l'équateur, et se

serait brisé en masses distinctes, qui seraient devenues les planètes.

Buffon a introduit la gravitation dans ce système à titre de principe conservateur. Dans son travail plein de génie sur la Formation des planètes (1745), il suppose que celles-ci auraient leur origine dans un « courant de matière » qu'une comète adventive aurait balayée loin du soleil. Kant, à son tour, émettait l'hypothèse d'un chaos primitif, formé de poussière immobile, qui, sous l'influence de la gravitation, se groupait autour d'un corps central, tout en formant autour de lui des anneaux de poussières animées de rotation et qui, avec le temps, s'agglomeraient pour former des planètes.

Or, la mécanique nous enseigne que de semblables masses qui n'ont pas, dès le début, un mouvement rotatoire, ne peuvent pas l'acquérir sous l'influence d'une force centrale telle que la pesanteur. C'est pourquoi Laplace admit, comme l'avait fait Swedenborg, que la nébuleuse primitive, origine de notre système solaire, tournait dès le début autour d'un axe. D'après lui, la contraction de ce système aurait détaché des anneaux, à peu près semblables à ceux de Saturne, et ceux-ci, à leur tour, auraient formé des planètes, leurs satellites et aussi des anneaux. On admet aujourd'hui qu'il ne peut s'être formé de cette manière que des météores et des petites planètes circulant autour du soleil, mais non les grandes planètes. Nous voyons effectivement de semblables anneaux de poussières, tournant autour de Saturne, ceux voisins de la planète plus rapidement que ceux plus éloignés, absolument comme une accumulation de tout petits satellites.

Un grand nombre d'autres objections ont été faites à l'hypothèse de Laplace par Babinet et, plus particulièrement dans des temps plus récents, par Moulton et par Chamberlin. Elle ne semble, en effet, pas défendable dans sa forme primitive. Je lui ai, en conséquence, substitué l'hypothèse développée dans ce qui précède. Il est assez frappant que les satellites des planètes les plus éloignées, de Neptune et d'Uranus, ne se meuvent pas dans des plans voisins de l'écliptique. Ils ont même un mouvement « rétrograde », c'est-à-dire qu'ils se meuvent en sens inverse de la circulation que suppose l'hypothèse de Laplace. Cela semble également être le cas d'un satellite découvert en 1898 par Pickering, qui circule autour de Saturne, ainsi que du 8 satellite de Jupiter, récemment découvert, qui est le plus éloigné de la planète d'entre eux tous. Ces faits étaient ignorés par Laplace (1776) qui n'aurait sans doute pas formulé son hypothèse s'il les avait connus, tout au moins telle qu'il l'a énoncée.

Mais l'explication de ces faits ne présente aucune difficulté.

D'après Darwin et Pickering, la rotation directe des planètes s'expliquerait comme suit. Elles étaient, dans l'origine, d'énormes sphères gazeuses, sur lesquelles l'attraction du soleil s'exerçait en produisant de puissantes marées. Celles-ci l'emportèrent finalement sur la rotation individuelle de la masse planétaire, jusqu'à produire l'état qui subsiste encore pour la lune et pour Mercure, deux astres qui tournent sans cesse leur même face vers le corps central autour duquel ils circulent. À ce moment la durée de rotation était donc égale à la durée de leur révolution. Par la suite, le corps gazeux se contracta rapidement à cause du refroidissement. L'effet de marée diminua très rapidement, en sorte que l'influence du soleil ne suffisait plus. La durée

de la rotation sur son axe diminua ainsi rapidement. Mais la planète conservait naturellement toujours le sens de sa rotation, qui est le même pour toutes les planètes intra-saturniennes. Elle était donc désormais de même sens que celui de la révolution dans son orbite, c'est-à-dire directe.

On peut cependant admettre que la matière qui se trouvait aux limites extrêmes de la nébuleuse primitive était tellement diluée que la planète qui venait s'y plonger ne put atteindre un volume suffisant pour être entraînée par la marée gazeuse, si faible à cette énorme distance, dans la grande rotation d'ensemble dans le plan équatorial du soleil.

Aux confins extrêmes de notre système solaire, où circulent Neptune et Uranus, les planètes conservèrent une partie importante de leur impulsion primitive, reçue lorsqu'elles pénétrèrent dans le système, ou qui, peut-être, leur fut communiquée par quelque choc. Lorsque, plus tard, les satellites furent détachés par suite de la contraction de la masse gazeuse, ils conservèrent un sens de révolution identique à celui de la rotation primitive, qui, pour ces planètes extrêmes, ne concorde pas avec l'écliptique. Les satellites extérieurs de Jupiter et de Saturne sont venus de l'espace, sous forme de comètes, et furent retenus dans des endroits où l'enveloppe gazeuse de la planète était si légère qu'elle ne suffisait pas pour arrêter le sens du mouvement du nouvel arrivant. De là vient que les orbites de ces deux lunes sont très éloignées du plan équatorial de leur corps central. Elles sont même rétrogrades et, en outre, fortement excentriques, plus que celles d'autres satellites. Mais le lent mouvement de Neptune et d'Uranus autour du soleil en fut influencé, de manière qu'ils prirent la direction et la trajectoire circulaire commune. Il n'est

pas impossible qu'il existe dans l'espace, plus loin encore que notre planète la plus éloignée, d'autres planètes appartenant à notre système, que nous ne connaissons pas, et dont le mouvement a lieu dans des orbites absolument irrégulières, comme celle des comètes. Ces dernières seront sans doute, ainsi que le suppose Laplace, entrées plus tardivement dans le système solaire, lorsque la condensation était déjà assez avancée, pour que la masse principale de la matière nébuleuse eût disparu des espaces interplanétaires.

Chamberlin et Moulton ont essayé de faire voir que l'on peut échapper aux difficultés inhérentes à l'hypothèse de Laplace, si l'on admet que le système solaire est sorti d'une nébuleuse en spirale, dans laquelle des corps étrangers ont fait irruption, condensant sur eux la matière nébuleuse environnante. Ne voit on pas souvent que la brume lumineuse, voisine des étoiles qui se trouvent entourées de nébuleuses, disparaît ? Ces étoiles correspondent sans doute à des planètes en voie d'évolution.

Pour terminer ces considérations, nous allons encore établir une comparaison entre les vues qui avaient cours il y a peu de temps, et celles qui s'ouvrent devant nous d'après les découvertes les plus récentes.

La gravitation newtonienne, qui, jusqu'au commencement du présent siècle, semblait dominer les mouvements et l'évolution du monde matériel, conduisait à considérer les corps célestes comme devant se grouper pour former des corps ayant des masses toujours croissantes. Dans le cours infini du temps, l'évolution conduirait à ce que d'immenses soleils seuls, lumineux ou éteints, puissent exister. Dans ces conditions, toute vie serait naturellement impossible.

Et pourtant, nous voyons à proximité même du soleil un nombre considérable d'astres obscurs, les planètes, et nous pouvons supposer à juste titre qu'il en existe aussi dans le voisinage d'autres étoiles. Nous ne pourrions, sans cela, nous expliquer d'aucune façon les singuliers mouvements d'allée et venue de ces étoiles. Nous observons de même qu'un nombre très considérable de petits corps célestes tombent sur notre globe, soit comme météorites, soit comme étoiles filantes. Ils viennent à nous des régions les plus éloignées des immensités de l'espace.

Deux circonstances expliquent ces écarts de ce que nous pourrions nous attendre à reconnaître comme conséquence de l'action exclusive de la pesanteur. C'est en premier lieu l'action de la force répulsive, et secondement le résultat de la rencontre de corps célestes entre eux. Le produit de ces rencontres est la formation de grands tourbillons gazeux autour de corps nébuliformes et gazeux. La force répulsive amène dans ces tourbillons gazeux de la poussière cosmique, peut-être déjà partiellement agglomérée en météores et en comètes. Elle y crée, concurremment avec les produits de la condensation des masses gazeuses environnantes, des planètes et les satellites de celles-ci.

L'effet d'expansion de la force répulsive des radiations équilibre donc la tendance de la gravitation qui est de centraliser toujours davantage la matière. Les tourbillons gazeux des enveloppes nébuleuses servent uniquement à retenir les poussières chassées au loin des soleils par la pression de radiation.

Dans les nébuleuses, les masses gazeuses sont les principaux endroits d'agglomération pour les poussières chassées par les soleils. Si le monde avait des limites, comme on le supposait jadis, c'est-à-dire si les étoiles étaient groupées en un seul grand amas,

autour duquel il n'y aurait qu'une immensité vide, les masses poussiéreuses envoyées au loin par les soleils en vertu de la force répulsive seraient perdues dans cet infini, comme on le suppose en général pour l'énergie de radiation des mêmes corps.

L'évolution des mondes devrait en ce cas avoir trouvé sa fin depuis longtemps, par suite d'une sorte d'anéantissement de la matière et de l'énergie. L'inanité de ce point de vue a été expliquée entre autres par Herbert Spencer, lorsqu'il fit voir qu'un cycle devait exister dans l'évolution du monde. Cela est manifestement nécessaire, si un système quelconque doit indéfiniment avoir une existence. Nous trouvons dans les parties froides, gazeuses, diluées des nébuleuses, l'élément du mécanisme de l'univers, qui fait équilibre à la prodigalité des soleils dans leur dépense de matière et, plus encore, de force. Les poussières adventices absorbent la radiation solaire et abandonnent leur chaleur à ces molécules gazeuses isolées, contre lesquelles elles viennent se heurter. Cette absorption de chaleur fait dilater la masse gazeuse tout entière, et elle se refroidit. Les molécules les plus chargées d'énergie s'éloignent, et elles sont remplacées par d'autres provenant de l'intérieur, plus dense, de la nébuleuse. Elles se refroidissent à leur tour.

C'est ainsi que tout rayon calorifique venant d'un soleil est absorbé, et que l'énergie qu'il transporte est transmise par les éléments gazeux de la nébuleuse, aux soleils en formation, voisins ou compris dans la nébuleuse. Elle se condense sur les centres d'attraction déjà retenus par la nébuleuse, ou sur les restes des corps qui, par leur rencontre, ont causé la formation de celle-ci. Le froid intense qui règne dans ces régions permet à la matière de s'agglomérer de nouveau. Si, au contraire, la température

s'élevait à 15° C, la force répulsive serait suffisante, d'après Poynting, pour tenir séparés des corps ayant 34 millimètres de diamètre, si leur densité est égale à celle de la terre, c'est-à-dire 5,5. Dans les régions où circule Neptune, où la température doit être voisine de 50 degrés absolus, c'est-à-dire à peu près celle des nébuleuses, cette dimension n'est plus que de 1 millimètre. Ainsi que nous l'avons indiqué plus haut, il est probable que, pour la première agglomération, les forces capillaires qui s'exerceront par suite de la présence des gaz condensés sur les grains de poussière joueront le plus grand rôle, et non la gravitation. — De même l'énergie peut s'y concentrer, contrairement à la loi de l'accroissement continu de l'entropie.

Ces effets conservateurs permettront aux couches gazeuses de se raréfier rapidement. Elles seront alors remplacées par de nouvelles masses de même matière venant de l'intérieur de la nébuleuse, jusqu'à ce qu'il n'en reste plus, et que cette forme de l'astre soit remplacée par un amas d'étoiles ou par un système planétaire qui circule autour d'un ou de plusieurs soleils.

Les rencontres de ceux-ci feront, à leur tour, naître de nouvelles nébuleuses.

Les matières explosives, dont nous avons plusieurs fois parlé, jouent un rôle capital dans l'évolution des nébuleuses vers l'état d'étoiles, et dans la formation des nébuleuses nouvelles après la rencontre de deux corps célestes, obscurs ou lumineux. Ces matières contiennent probablement de l'hydrogène et de l'hélium (peut-être aussi du nébulium), en combinaison avec du carbone et avec des métaux. Les principes de la thermodynamique conduisent à cette conclusion, que ces matières explosives se forment pendant l'évolution des soleils, et qu'elles sont détruites

lors de leurs rencontres. L'énergie énorme qui se trouve accumulée dans ces corps les rend semblables à des volants gigantesques dans le mécanisme de l'univers ; ils règlent sa marche et ils sont cause que l'alternance régulière entre l'état de nébuleuse et celui de soleil a lieu suivant un rythme uniforme, pendant les espaces de temps incalculables, que nous devons considérer comme caractéristiques dans le développement des mondes.

Par cette action de compensation entre pesanteur et radiation, ainsi que par des échanges de température et de concentration de la chaleur, il devient possible à l'évolution du monde de parcourir un cycle perpétuel, où nous ne voyons ni commencement ni fin. Elle nous conduit également à penser que la vie aussi a des chances de se perpétuer indéfiniment et sans diminution.

Mais une partie notable de la chaleur de combustion s'échappe dans l'air avec les gaz produits dans le foyer. D'autre part la chaudière et la machine elles-mêmes en perdent une proportion notable par conductibilité et par rayonnement. Le rendement des machines n'arrive donc jamais au travail théoriquement déterminé en partant de la chaleur produite par la combustion. Elles n'en rendent qu'une fraction. Les meilleures d'entre elles n'ont guère qu'un rendement de 50 p. 100.

La puissance d'une machine à vapeur dépend donc de la tendance que possède la chaleur à passer d'un milieu plus chaud à un milieu moins chaud. C'est ce qui revient au même que de dire que l'entropie a une tendance à grandir toujours.

08

Nous venons de voir combien il est probable que les systèmes solaires proviennent de l'évolution des nébuleuses et que les nébuleuses soient le résultat du choc des soleils. Nous avons également admis comme probable qu'il circule, autour des soleils reconstitués à nouveau, de plus petits corps célestes qui se refroidissent plus rapidement que le soleil central. Après que ceux-ci se sont recouverts d'une croûte solide, en partie occupée par des océans, ils peuvent, dans des conditions favorables, devenir porteurs de la vie organique comme la terre, et comme il est probable pour Mars et Vénus. Ils auront ainsi pour nous un intérêt particulier, plus grand que si nous devions nous les représenter seulement comme une matière sans vie.

Une question se présente, par conséquent, tout naturellement : celle de savoir si la vie peut réellement apparaître à la surface d'un corps céleste, dès que les conditions y seront de nature à favoriser son développement et son extension. C'est la question dont nous voulons nous occuper dans ce dernier chapitre.

Dès les temps les plus reculés, la réflexion et l'étude des phénomènes de la vie organique doivent avoir rendu l'homme attentif à ce fait que tous les êtres vivants sont procréés et qu'après un certain temps, plus ou moins long, ils finissent par la mort. — Plus tard, mais encore dans une période très primitive, l'expérience doit avoir fait comprendre que des organismes d'une espèce donnée ne peuvent produire que d'autres organismes semblables. En d'autres mots, que les espèces sont invariables. On se représentait que toutes les espèces étaient, à l'origine, sorties de

la main du Créateur, avec leur constitution actuelle. Cette façon de voir est sans doute encore aujourd'hui la plus répandue, que l'on peut appeler orthodoxe.

Cette conception est souvent attribuée à Linné, parce que dans la cinquième édition de son Genus plantarum il s'y tient strictement en s'exprimant comme suit : « Species tot sunt quot diversas formas ab initio produxit Infinitum Ens, quæ deinde formæ secundum generationis inditas leges produxere plures, at sibi semper similes, ut species nunc nobis non sint plures quam fuere ab initio. » Autrement dit, « Il existe autant d'espèces qu'il a plu à l'Être Infini de créer de formes diverses à l'origine. Par la suite ces espèces en ont, suivant les lois de la reproduction, produit d'autres, toujours semblables à elles-mêmes, de manière que nous n'avons pas aujourd'hui plus d'espèces que dès l'origine. »

Mais déjà à ce moment le temps était venu, d'une conception moins rigide de la nature, que le progrès a amené petit à petit à nos vues actuelles. Les premières bases de la loi de l'évolution dans les sciences biologiques furent jetées par Lamarck, en 1794, par Treviranus (1809), par Gœthe et par Oken (1820). Une réaction se produisit sous l'autorité de Cuvier qui ramena l'opinion générale à son point de vue ancien. Il admettait que les êtres, aujourd'hui disparus, et qui nous sont connus par les époques géologiques passées, avaient été victimes des cataclysmes de la nature, après lesquels de nouvelles espèces avaient surgi à la suite de nouveaux actes créateurs.

Un revirement s'est cependant produit contre cette manière très générale de voir. Il a été très rapide dans les dernières dizaines d'années, par suite de la grande extension de la doctrine

de l'évolution, surtout depuis que l'immortel Charles Darwin l'a développée dans ses ouvrages.

Cette doctrine veut que les espèces s'accommodent, dans le cours des temps, aux conditions extérieures. Petit à petit leur variation peut devenir si grande, que l'on peut dire qu'une espèce nouvelle est procédée d'une plus ancienne. Cette opinion s'est même précisée et fortifiée dans ces derniers temps, par les travaux de De Vries. Nous pouvons dire aujourd'hui qu'il y a des cas où, sous nos yeux, il se crée des espèces nouvelles, provenant en quelque sorte brusquement des anciennes. Cette doctrine a pris le nom de théorie de la mutation.

Nous sommes donc aujourd'hui arrivés à penser que les êtres organisés vivants, que nous voyons autour de nous, proviennent tous d'organismes plus anciens, qui leur étaient passablement dissemblables, et dont nous trouvons des traces et des restes dans les dépôts géologiques antérieurs à nous, qui se sont déposés depuis des millions et des millions d'années. Ce point de vue permet de croire que tous les êtres organisés descendent d'un être vivant primitif, extrêmement simple, ou plus probablement de quelques individus peu nombreux. Comment cet être unique, ou ces rares organismes primitifs sont-ils venus à l'existence sur la terre, c'est ce qui reste encore à découvrir.

La conception la plus usuelle, qui était déjà celle des anciens, veut sans doute que des êtres inférieurs puissent naître sans provenir d'un germe. On avait remarqué que des êtres vivants très inférieurs, des larves, etc., se montraient sur de la viande corrompue : — Virgile en parle dans ses Géorgiques. Cette opinion s'est maintenue très universellement jusqu'au xvii siècle, où elle fut combattue par de nombreuses expériences, entre autres celles

de Swammerdam et de Leeuwenhoek. La doctrine de la génération spontanée refleurit cependant lorsqu'on eut découvert les infusoires, ces petits organismes vivants que l'on trouve dans des liquides ayant bouilli, ou dans des infusions, sans qu'on puisse, à première vue, en donner aucune raison. Spallanzani prouva cependant, en 1777, que si ces infusions et le vase qui les contient, ainsi que l'air dans lequel ils se trouvent, ont été suffisamment chauffés pour tuer tous les germes, le tout restait stérile, c'est-à-dire qu'aucun être vivant ne fait plus son apparition. Cette observation est, aujourd'hui encore, le principe qui sert dans la fabrication des conserves.

On opposa des objections à cette démonstration. On dit que, par le chauffage, l'air s'altérait si profondément que le développement des petits êtres en était rendu impossible. Mais ces objections furent réfutées par les chimistes Chevreul et Pasteur, puis par le physicien Tyndall dans les années 1860 à 1880. Ils firent la preuve que l'air, débarrassé de ses plus petits germes autrement que par un fort échauffement, par exemple par la filtration à travers du coton, ne peut plus causer le développement d'aucun germe. Ce sont tout particulièrement les travaux du grand Pasteur et ses méthodes de stérilisation dont l'application est continuelle dans le laboratoire de bactériologie, qui nous ont de plus en plus contraints à reconnaître qu'un germe est indispensable à la production de la vie.

Néanmoins on voit encore toujours des chercheurs éminents s'efforcer de prouver la possibilité de la génération spontanée. Ils ne se servent pas pour cela de la méthode si sûre des sciences naturelles, mais ils recourent à un mode de raisonnement philosophique. La vie, disent-ils, doit avoir eu un commencement ; c'est

pourquoi il faut bien croire que la génération spontanée doit avoir existé au moins une fois, bien que nous ne puissions plus la réaliser dans les conditions actuelles. Il y eut grande émotion lorsque le célèbre physiologiste anglais Huxley crut trouver dans la vase retirée du fond des mers un certain corps albuminoïde, auquel il donna le nom de Bathybius Haeckelii en l'honneur de l'ardent darwiniste allemand Haeckel. On crut pendant longtemps avoir trouvé, dans ce Bathybius (ou organisme des profondeurs) le plasma primitif, qui aurait pu servir d'origine à tous les êtres vivants, et dont Oken avait déjà rêvé. Les recherches ultérieures du chimiste Buchanan ont cependant prouvé que le corps qui, dans ce plasma, paraissait être de l'albumine, n'était que des flocons de plâtre précipité par l'alcool.

On eut ensuite recours à des explications vraiment pleines de fantaisie. On soutint que la vie pouvait peut-être avoir eu son origine dans la masse incandescente de l'intérieur de la terre. Une température très élevée pouvait être cause de la formation de combinaisons organiques telles que des composés du cyanogène et leurs dérivés, qui seraient devenus les points de départ de la vie (Pflüger). On n'est que peu tenté de s'occuper de rêves semblables, avant qu'ils n'arrivent à s'appuyer sur quelque base expérimentale.

Il ne se passe guère d'année sans que la littérature biologique nous apporte quelque affirmation qu'on est enfin parvenu à animer de la matière morte. Parmi les plus récentes d'entre elles, une découverte du D Burke a attiré le plus d'attention. Il affirmait qu'à l'aide de cette matière merveilleuse, le radium, il avait réussi à faire naître de la vie dans une matière inerte, dans de la

gélatine. La froide critique a cependant vite fait de rejeter cette affirmation, comme tant d'autres, dans le pays des fables.

Il nous faut donc bien nous ranger à l'opinion que le grand physicien Lord Kelvin formulait sur ce sujet comme suit : « Une très vieille opinion, à laquelle se rangent encore un grand nombre de naturalistes, veut que, dans des conditions météorologiques peu semblables à celles d'aujourd'hui, de la matière morte se soit « combinée », ou « cristallisée », ou qu'elle ait « fermenté » pour former des « germes de vie », ou encore des « cellules organiques », ou du « protoplasma ». La science nous fournit cependant en nombre considérable des preuves induites contre cette hypothèse de la génération spontanée. De la matière sans vie ne peut pas acquérir de la vitalité, sans l'influence de matière déjà animée. Cela me semble être un principe scientifique tout aussi certain que la loi de la gravitation universelle. »

Bien que cette dernière expression puisse sembler quelque peu exagérée, elle montre cependant combien péremptoire est, aux yeux de bien des hommes de science, la nécessité de chercher une autre issue pour sortir de difficulté. Nous en trouvons un dans la théorie de la « Panspermie » suivant laquelle des germes de vie remplissent les espaces de l'univers, rencontrent les planètes errantes, et remplissent leur surface de vie, dès que les conditions nécessaires à l'existence des organismes s'y trouvent réunies.

Ce point de vue semble avoir de très anciens précurseurs. On trouve des affirmations dans ce sens déjà chez Sales-Guyon de Montlivault (1821) qui émit l'hypothèse que des germes venus de la lune avaient éveillé pour la première fois la vie à la surface de notre terre. En Allemagne, un médecin, le D H. E. Richter, a

cherché à compléter les théories de Darwin en y ajoutant l'idée de la panspermie (1865). Le livre de Flammarion sur la pluralité des mondes habités le conduisit à cette idée que des germes venus d'un autre monde habité pourraient être parvenus jusqu'au nôtre. Il appuie sur ce fait que l'on trouve dans des météorites, dont les orbites ressemblent à celles de certaines comètes vagabondes, du charbon, qu'il considère comme des restes d'êtres organisés. Ce point de vue n'est cependant appuyé d'aucune preuve ; le charbon trouvé dans les pierres météoriques n'a jamais présenté la moindre trace de structure organique, et l'on admettra sans peine qu'il existe du carbone d'origine inorganique, puisqu'on en reconnaît par exemple dans le soleil. Une autre des idées de Richter est encore plus aventurée, quand il suppose que des organismes flottant très haut dans l'air peuvent être attirés par un météore passant, et se trouver ainsi lancés dans l'espace et portés jusqu'à d'autres corps célestes. Si, malgré tout, une météorite pouvait porter à sa surface des germes susceptibles de vie, ils seraient certainement brûlés dans l'atmosphère de la terre, ou de tout autre planète similaire, lors de sa chute.

Sur un point, toutefois, nous devons donner raison à Richter. Son affirmation est pleine de logique lorsqu'il dit ceci : « L'espace mondial est rempli de corps (peut-être suffisait-il de dire qu'il en contient) en voie d'évolution, d'autres déjà mûrs, d'autres enfin mourants, où nous comprenons comme mûrs, ceux qui sont en état d'héberger des organismes vivants. Nous concevons par conséquent l'existence de la vie organique dans l'univers comme éternelle : elle fut de tout temps, elle s'est propagée d'une façon continue, toujours sous la forme d'organismes vivants, de cellules et d'individus composés de cellules. »

Les hommes ont jadis creusé le problème de la création de la matière, mais ils ont abandonné ces spéculations depuis que le progrès a démontré que la matière est indestructible, et ne peut être que transformée. De même que jamais, par des raisons de même ordre que celles concernant la matière, nous ne posons la question de savoir quelle est l'origine de l'énergie de mouvement, de même aussi nous pouvons bien nous habituer à la pensée que la vie a toujours existé, et que c'est un travail inutile de chercher à en connaître l'origine.

Les idées de Richter furent adoptées par le célèbre botaniste Ferdinand Cohn, qui, en 1872, les fit connaître dans une conférence populaire. Mais la plus connue des affirmations dans ce sens est peut-être celle du grand physicien, Sir William Thomson, plus tard Lord Kelvin, qui, en 1871, tenait le langage suivant, dans son discours inaugural du Congrès des naturalistes anglais, à Édimbourg : « Lorsque deux corps célestes se rencontrent dans l'espace, une grande partie des deux entre sûrement en fusion. Mais il semble tout aussi certain que, dans nombre de cas, une quantité d'éclats sont lancés dans l'espace dans toutes les directions. Il se peut que beaucoup d'entre eux ne subissent pas de dommage plus grand que les blocs de roches qui tombent du haut d'une montagne, ou que l'on a fait sauter à l'aide d'un explosif. Si notre terre, dans son état actuel, avec son revêtement de végétation, venait à rencontrer un corps à peu près de même importance, un grand nombre de fragments, grands et petits, porteurs de semences, de plantes vivantes, d'animaux, seraient sans aucun doute dispersés dans l'espace. Comme il a indubitablement existé, depuis des temps infinis, des mondes porteurs d'êtres vivants, nous devons considérer comme fort probable qu'il existe une infinité de pierres météoriques, chargées de germes, errant dans

l'espace. Or, s'il n'existait sur la terre aucune forme de vie, une semblable météorite, si elle tombait à sa surface, pourrait faire en sorte que la vie s'y développât. Je sais fort bien que cette hypothèse est sujette à de nombreuses objections scientifiques, et je ne veux pas fatiguer votre attention, en ce moment, à les discuter. Tout ce que je désire dire, c'est ma conviction que ces objections sont susceptibles de réfutation. »

Nous regrettons de ne pas partager sur ce point l'optimisme de Lord Kelvin. Il est tout d'abord douteux que des êtres vivants puissent supporter le formidable choc qui causerait l'écroulement de deux mondes. Ensuite nous savons qu'une météorite tombant sur la terre devient incandescente sur toute sa surface, conséquence de son frottement dans l'atmosphère qu'elle traverse. Toute semence y perd sûrement sa puissance germinative. D'ailleurs les météorites sont constituées d'une façon absolument différente que ne le serait un fragment de la croûte d'une planète analogue à la terre.

Les plantes se développent presque exclusivement dans les couches meubles de la surface terrestre. Un fragment de matière analogue à ces couches, qui viendrait à choir dans l'atmosphère terrestre, y serait réduit, par la résistance de l'air, en une infinité de petits fragments, chacun desquels s'enflammerait à la façon d'une étoile filante. Aucun d'entre eux n'atteindrait la surface du globe sinon sous forme de poussière calcinée.

Une autre difficulté encore : de semblables collisions, qui correspondent, comme nous le croyons, à l'apparition d'étoiles nouvelles, sont, en somme, des phénomènes très rares. Il semble y avoir peu de probabilité que des germes vivants se trouvent véhiculés de cette façon à un endroit déterminé comme notre terre.

La question est entrée, cependant, dans une phase beaucoup plus favorable à l'idée générale, depuis que la pression de radiation a été connue.

Nous avons dit, dans un chapitre précédent, que les corpuscules qui subiraient la plus forte influence de la force répulsive du soleil, auraient, d'après les calculs de Schwarzschild, un diamètre de 0,00016 mm., — à supposer qu'ils fussent sphériques. La première question qui se pose donc, sera celle-ci : Existe-t-il des germes vivants d'une aussi extraordinaire ténuité ? Les botanistes nous répondront que les spores de beaucoup de bactéries ont un diamètre de 0,0003 mm. à 0,0002 mm., et qu'il en existe, sans aucun doute, de beaucoup plus petits encore, bien que nous n'ayons pas encore pu les découvrir à l'aide du microscope. Ainsi, par exemple, la fièvre jaune de l'homme, la rage du chien, la fièvre aphteuse bovine et la maladie mosaïque, qui aux Indes Néerlandaises apparaît sur les feuilles de tabac, sont, sans nul doute, des maladies bactériennes. Leurs microbes n'ont cependant pas encore pu être découverts, sans doute parce qu'ils sont trop petits, et par suite invisibles dans nos meilleurs microscopes. Il est donc très probable qu'il existe des êtres vivants assez petits, pour que la pression de radiation du soleil puisse les renvoyer dans l'espace, où ils pourraient susciter la vie sur des planètes qui lui offriraient un lieu favorable à leur développement.

Essayons, par un calcul sommaire, de nous rendre compte comment un semblable microorganisme pourrait être arraché à la terre et chassé dans l'espace par la force répulsive du soleil. Il y traverserait tout d'abord l'orbite de Mars, puis celles des petites planètes et des planètes extérieures. Après avoir dépassé celle de

Neptune, — dernière étape dans le système solaire, — il serait lancé dans l'infini, vers d'autres systèmes solaires. Il n'est pas difficile d'évaluer le temps que mettraient les corpuscules affectés du mouvement le plus rapide, pour faire ce trajet.

Supposons-leur une densité égale à celle de l'eau, ce qui coïncide à peu de chose près avec la réalité. Ils seraient transportés jusqu'à la distance de l'orbite de Mars dans une vingtaine de jours, à celle de Jupiter en 80 jours, et à celle de Neptune en 14 mois. Le système solaire le plus proche de nous, celui de α du Centaure, serait atteint au bout de 9 000 ans.

Ces calculs ont été faits en admettant que la force répulsive du soleil est de quatre fois supérieure à celle de la gravitation, ce qui serait à peu près le cas, suivant les données numériques de Schwarzschild.

Les durées de trajet indiquées pour atteindre une autre planète de notre système ne sont pas si longues, que le germe vital en cause ne puisse avoir conservé sa puissance germinative. Il en est différemment pour la longue durée de quelques milliers d'années que suppose le trajet d'un système planétaire à un autre. Mais, ainsi que nous le dirons plus loin, la température extrêmement basse (environ –220° C) des régions interstellaires a pour effet de suspendre à peu près toutes les réactions chimiques, et conséquemment aussi la disparition de la faculté germinative.

On a jadis affirmé couramment, à propos de la durée de cette faculté, dans les conditions ordinaires de température, que les céréales appelées « Blé des momies », qui ont été trouvées dans les anciennes sépultures égyptiennes, avaient encore de la vitalité. La critique a prouvé que les renseignements donnés par les

Arabes sur les origines de ces découvertes étaient fort sujets à caution. Par contre, un savant français, M. Baudoin, a montré que des bactéries susceptibles de germer avaient été reconnues dans une sépulture romaine, qui, sûrement, était restée intacte pendant 1 800 ans. Peut-être faut-il néanmoins accueillir encore avec précaution cette affirmation. Mais, ce qui est absolument certain, c'est que des graines de certaines plantes d'ordre supérieur, aussi bien que des spores de quelques bactéries, du sang de rate par exemple, peuvent conserver leur vitalité pendant une vingtaine d'années. C'est une durée bien plus longue que celles indiquées plus haut pour les trajets interplanétaires.

En quittant notre globe, un germe vital serait exposé pendant un mois environ à une forte lumière solaire. Or on a démontré que les rayons les plus réfrangibles de cette lumière tuent, dans un temps relativement court, les bactéries et leurs spores. Mais les expériences faites sur ces spores l'ont en général été dans des conditions où ceux-ci pouvaient germer, se trouvant placées sur une matière humide. (Nous faisons ici allusion aux travaux de Marshall-Ward.) Cela ne correspond en aucune façon aux conditions de l'espace interplanétaire où se trouveraient les spores que nous considérons. Roux a, par contre, fait voir que des germes du sang de rate, qui sont rapidement tués par la lumière quand l'air atmosphérique les baigne, résistent au contraire, pleins de vie, lorsqu'ils sont privés d'air. Un grand nombre de spores ne souffrent que fort peu, ou même pas du tout, d'être frappés par la lumière. Tel est le cas, d'après Duclaux, pour Tyrothrix scaber que l'on trouve dans le lait, et qui vit parfaitement pendant un mois dans l'éclairage d'une forte lumière solaire. Tous les botanistes, que j'ai pu consulter à ce sujet, se sont montrés d'avis que l'on ne peut nullement affirmer avec certitude, que le rayonne-

ment solaire tuerait tous les spores, pendant leur trajet à travers les espaces interplanétaires.

On pourrait objecter encore que ces germes seront exposés, pendant leur transport à travers les espaces, et pendant la majeure partie du temps, à un froid intense, qu'ils ne seront sans doute pas en état de supporter. Quand ils arriveront à l'orbite de Neptune, leur température sera descendue à –220° C. Plus loin, elle peut descendre peut-être plus bas encore. Or, on a fait dans ces derniers temps, à l'Institut Jenner à Londres, des expériences sur des spores de bactéries, que l'on a conservés pendant 20 heures dans de l'hydrogène liquide, à –252° C. Leur faculté germinative a parfaitement survécu à ce refroidissement.

Le professeur Macfadyen, de Londres, a été plus loin encore. Il a fait voir que des microorganismes peuvent être maintenus pendant six mois à une température d'environ –200° C, dans de l'air liquéfié, sans perdre leur faculté germinative.

Il n'est pas improbable qu'à des températures extrêmement basses la puissance germinative se maintient beaucoup plus longtemps qu'aux températures ordinaires de notre globe. Sa disparition repose probablement sur quelque réaction chimique, et toutes ces réactions se font en général beaucoup plus lentement à mesure que la température diminue. Les fonctions vitales s'intensifient à peu près dans le rapport de 1 à 2,5 quand la température s'élève de 10 degrés. Quand, par conséquent, les spores, dans leur voyage, auraient atteint l'orbite de Neptune, et que leur température serait descendue à –220 degrés, les réactions vitales se feraient avec une intensité d'environ un milliard de fois moins grande qu'à 10° C. La puissance germinative ne diminuerait donc pas à –220 degrés dans l'espace de 3 millions d'années, plus que

dans une seule journée à 10 degrés. Il n'est pas improbable que le froid intense qui règne dans les espaces stellaires soit puissamment conservateur à l'égard des germes repoussés au loin. Ces germes seraient ainsi en état de supporter des trajets infiniment plus longs que nous ne serions portés à le supposer d'après leurs conditions d'existence aux températures qui nous sont normales.

MM. Madsen et Nyman, ainsi que MM. Paul et Prall, ont fait un certain nombre d'expériences très remarquables sur l'influence de la température dans l'extinction de la vie. Les premiers ont cherché la résistance des spores du sang de rate, à des températures variées au dessous de zéro. Lorsqu'elle était basse, par exemple dans une cave à glace, les spores se conservaient en vie pendant des mois, sans rien perdre sensiblement de leur faculté de développement. À 100 degrés, au contraire, elles périssaient en quelques heures. Ce qu'il y a de remarquable ici, c'est que la température a la même influence que sur d'autres fonctions vitales, de manière que le développement se fait environ deux fois et demie plus vite quand la température s'élève de 10 degrés. Ceci est d'ailleurs à peu près conforme à l'hypothèse que j'ai mise à la base de mes calculs sur la faculté germinative par des températures très basses.

Tandis que ces expériences étaient faites pour des températures supérieures à zéro, celles de Paul et Prall se rapportaient en partie au point d'ébullition de l'air liquide (–190° C). On employa dans ce cas des formes végétales, à l'état sec (et non des spores), de Staphylocoques, qui sont des bactéries. Tandis qu'à la température ambiante d'une chambre ces êtres mouraient après trois jours environ, leur vitalité n'était pas diminuée d'une façon sensible après des mois, à la température de l'air liquide. C'est là une

preuve particulièrement frappante du pouvoir de conservation des grands froids sur la faculté vitale. Ce froid est cependant plus intense encore dans les espaces qui séparent les divers systèmes solaires entre eux.

Il en est sensiblement de même au point de vue de la dessiccation, dont l'action est si nuisible sur les plantes. Les espaces interplanétaires, où règne le vide, sont naturellement d'une sécheresse absolue. Les recherches de B. Schroeder ont fait voir qu'une algue verte que l'on trouve généralement sur des écorces d'arbres, le Pleurococcus vulgaris peut être conservé pendant 20 semaines dans une absence d'humidité que l'on peut qualifier absolue, (au-dessus de l'acide sulfurique concentré, dans un appareil à dessécher) sans perdre sa faculté vitale. Il est probable que certaines graines et des spores pourraient supporter de plus longues sécheresses encore.

La tension de la vapeur d'eau diminue avec la température à peu près dans les mêmes proportions que l'énergie des réactions chimiques, dont il a été question plus haut. L'évaporation de l'eau, c'est-à-dire la dessiccation, n'augmentera donc pas, à la température de –220° C, en 3 millions d'années, plus qu'en un jour où la température serait de 10 degrés. Dans ces conditions on est conduit à admettre que les spores, dont la résistance à la dessiccation est particulièrement grande, peuvent parfaitement voyager d'une planète à une autre, et même d'un système planétaire à un autre, tout en conservant intégralement leur vitalité.

L'effet mortel de la lumière sur les spores semble être causé, suivant les travaux de Roux, par une oxydation que produit le milieu atmosphérique ambiant. Dans les espaces interplanétaires cette cause disparaît. En outre, à la distance de l'orbite de Nep-

tune, la radiation du soleil est 900 fois moins forte qu'à la distance de la terre au soleil. À mi-distance de l'étoile fixe la plus proche, α du Centaure, cette radiation est vingt milliards de fois moins puissante encore. Sa lumière semble ainsi devoir être à peu près sans danger pendant le trajet des spores.

Si donc les germes des plus petits organismes de notre globe pouvaient se détacher de lui, ils se répandraient de tous côtés, et l'univers en serait en quelque sorte ensemencé. Mais ici se présente la question : comment peuvent-ils se dégager de l'effet de la pesanteur terrestre ? D'aussi petits corpuscules, légers comme ils le sont, peuvent être facilement entraînés par les courants aériens. Une gouttelette de pluie, d'un diamètre d'un cinquantième de millimètre, tombe vers la surface de la terre, par une pression atmosphérique moyenne, à raison de 4 centimètres par seconde. Cela permet de calculer qu'un spore de bactérie, dont le diamètre ne serait que de 0,00016 mm., ne tomberait que de 83 mètres dans l'espace d'une année. Il en résulte que des corps aussi petits suivront inévitablement tous les courants atmosphériques, et pourront monter jusque dans les régions où l'air est très raréfié. Un courant d'air, qui aurait 2 mètres de vitesse par seconde, les enlèverait facilement à une hauteur où la pression ne serait plus que de un millième de millimètre de mercure c'est-à-dire à environ 100 kilomètres d'altitude. Aucun mouvement de l'air ne saurait cependant les expulser de l'atmosphère.

Pour expliquer que des spores puissent s'éloigner encore davantage de la terre, il faut donc l'intervention d'autres forces. Nous savons déjà que les actions électriques peuvent nous sortir de beaucoup de difficultés. À des hauteurs telles que 100 kilomètres, nous trouvons les phénomènes de radiation des aurores.

Or, nous croyons que ces aurores sont causées par les décharges électriques de grandes quantités de poussières chargées négativement, et provenant du soleil. Si donc un spore venant de la surface terrestre se charge d'électricité négative par suite de sa rencontre avec ces poussières, il peut être à son tour renvoyé vers l'océan d'éther par la répulsion des autres particules identiquement chargées.

Supposons maintenant, suivant les théories de la science moderne, que des charges électriques aient une limite de divisibilité, tout comme la matière elle-même, et qu'on arrive à un minimum de charge. On peut l'évaluer à environ 3,5×10 unités électrostatiques.

On peut alors calculer sans peine quelle doit être la puissance d'un champ électrique suffisant pour repousser plus loin, en sens inverse de la pesanteur, un spore chargé comme nous venons de le dire, et dont le diamètre est de 0,00016 mm. On trouvera qu'il suffit pour cela d'un champ de 200 volts par mètre. On constate souvent des champs électriques de cette intensité, à la surface de la terre, lorsque l'air est pur et le ciel clair. À Potsdam, la valeur moyenne de la chute de potentiel est de 242 volts par mètre. Dans la région des aurores, ce champ est vraisemblablement beaucoup plus énergique et suffit sans doute très bien pour contrebalancer l'effet de l'attraction terrestre sur les spores arrivés à ces hauteurs, et pour les expédier plus loin dans l'espace mondial.

Il devient ainsi probable que des germes, appartenant aux organismes les plus inférieurs qui nous soient connus sur la terre, sont continuellement projetés loin de la terre, comme aussi de telle autre planète où ils pourraient exister. Tout comme dans les

germes, la plupart de ces spores vont au-devant de la mort dans les espaces si froids de l'étendue infinie qui nous entoure ; mais une faible fraction d'entre eux peut parfaitement tomber sur d'autres corps célestes et y propager la vie si des conditions favorables s'y trouvent réunies. En général ce ne sera pas le cas. D'autres fois, il se peut qu'ils tombent sur un sol fertile. Et lors même qu'il s'écoulerait des millions d'années entre le moment où une planète est susceptible de devenir un véhicule de vie, et celui où un premier germe y tombe et fructifie, pour en prendre possession pour la vie organique, cela est encore peu de chose relativement à la durée pendant laquelle cette vie pourra y subsister en plein développement.

Les germes minuscules qui sont, de cette façon, répandus par les planètes, où leurs ancêtres avaient élu domicile, peuvent ou bien voyager librement à travers les espaces, ou bien atteindre, comme il vient d'être indiqué, des planètes plus lointaines, ou enfin des systèmes planétaires formés autour d'autres soleils. Ils peuvent encore rencontrer d'autres particules poussiéreuses plus importantes qui de leur côté retombent dans la direction du Ainsi, dans la partie de la lumière zodiacale que l'on appelle le « reflet » (Gegenschein) que l'on observe régulièrement dans les tropiques, — plus rarement chez nous —, et qui se trouve juste en opposition avec le soleil, les astronomes disent avoir reconnu des torrents de poussières extrêmement fines, qui, par suite de la force de la gravitation, se précipitent vers le soleil (Comp. p. 160).

Admettons maintenant qu'un germe de 0,00016 mm. de diamètre rencontre un de ces grains de poussière, dont le diamètre, dix fois plus grand, ne soit cependant que de 0,0016 mm., dont le volume soit par conséquent mille fois plus grand, et qu'il s'at-

tache à sa surface. Ce germe sera emporté de nouveau dans la direction du soleil. Il repassera par les orbites des planètes intérieures, et il peut se trouver englobé dans l'atmosphère de l'une d'elles.

Ces poussières ne mettent qu'un temps relativement faible pour parvenir d'une orbite planétaire à une autre. Supposons leur vitesse nulle, au moment où elles se trouvent à la distance de Neptune. Le germe pourrait provenir tout aussi bien de l'un des satellites de Neptune que de la terre, car cette planète, tout comme Uranus, Saturne, ou Jupiter, ne sont guère arrivés encore à une température assez basse pour être des séjours de vie. Partant de cette orbite, la poussière mettrait 21 ans pour arriver à celle d'Uranus, et 29 ans pour arriver à celle de Mercure.

Dans des conditions semblables, c'est-à-dire en supposant que leur vitesse initiale soit nulle, ces particules mettraient 12 ans pour faire le trajet entre les orbites d'Uranus et de Saturne, 4 ans entre celles de Saturne et de Jupiter, 2 ans entre Jupiter et Mars, 84 jours entre Mars et la terre, 40 jours entre la terre et Vénus, et 28 jours enfin entre les orbites de Vénus et de Mercure.

On voit, par les durées de chute ainsi calculées, que les germes en question, fixés aux parcelles de poussière, pourraient encore tomber vers le soleil avec une vitesse dix ou vingt fois moins grande sans qu'il fallût craindre la disparition de leur puissance germinative pendant le trajet. En d'autres mots, si les germes se trouvaient liés à des particules dont la pesanteur est neutralisée par la force répulsive dans la proportion de 90 à 95 p. 100 de son intensité, ils pourraient bientôt arriver dans l'atmosphère des planètes intérieures, animés seulement d'une vitesse réduite à quelques kilomètres par seconde. On peut calculer aisément

qu'une semblable particule, arrêtée dans sa chute dans l'espace très court d'une seconde, ne s'échaufferait cependant pas de plus de 100 degrés au delà de la température ambiante, et cela, par suite d'un très intense rayonnement. Des spores bactériens peuvent supporter de semblables températures pendant bien plus d'une seconde sans être tués. Après avoir été arrêtées avec les germes qui s'y trouveraient fixés, les poussières tomberaient doucement à la surface de la planète, aidées peut-être par quelque courant d'air descendant.

C'est ainsi que la vie pourrait être rapidement transportée d'un point du système planétaire où elle aurait déjà pris pied, à quelque autre point du même système où elle trouverait des conditions favorables à son développement.

Les germes non fixés par quelques grains de poussière peuvent de leur côté être emportés jusqu'à d'autres systèmes solaires, et finalement arrêtés dans leur course par la force répulsive de ces soleils. Ils ne peuvent pas en approcher plus près qu'à la distance où ils rencontreront une force répulsive égale à celle qui les a mises en mouvement. Des germes provenant de notre globe, qui est cinq fois plus rapproché du soleil que Jupiter, pourraient approcher d'un autre soleil cinq fois plus près que ceux qui auraient eu pour point de départ cette planète.

Le voisinage des soleils qui pourraient retenir, par leur radiation, les germes qui en approchent, et les rejeter vers l'espace, sera évidemment rempli d'une multitude de ces corpuscules. Les planètes qui suivent leurs orbites autour de ces soleils sont évidemment dans des conditions meilleures pour en recueillir, que s'ils ne se trouvaient pas sous la dépendance de ce soleil. De plus, les germes auront à ce moment perdu la vitesse considérable qui

les animait pendant leur trajet d'un système à un autre ; en tombant dans l'atmosphère de ces planètes ils s'échaufferont par conséquent beaucoup moins.

Au voisinage des soleils, les germes qui sont repoussés vers l'espace trouvent encore des particules dont le poids est un peu plus grand que la force répulsive de la radiation, et qui par conséquent retournent vers ces astres. Tout comme les germes, ces particules seront retenues dans le voisinage des soleils. Il y a donc une très grande probabilité que ces germes minuscules, par leur fixation sur des poussières, seront empêchés de s'en aller vers l'espace et se trouveront, au contraire, entraînés vers des planètes plus voisines du soleil.

Il est possible que ce soit de cette façon que la vie ait été, depuis des temps infinis, transmise d'un système solaire à l'autre, ou de planète à planète dans un même système. Mais, parmi les billions de grains de pollen que le vent emporte d'un seul arbre, — un pin par exemple, — il n'y en a peut-être qu'un seul qui, en moyenne, devienne le germe d'un arbre nouveau. Il en est de même sans doute pour les germes errants, et un seul entre des billions ou des trillions de germes lancés vers l'infini par la force de radiation trouvera une planète jusque-là sans vie, pour y devenir le point de départ d'organismes multiples.

Cette version de la panspermie nous conduit donc en fin de compte à admettre que les êtres organisés de l'univers entier ont une certaine parenté. Ils consistent en cellules, formées des combinaisons diverses du carbone, de l'hydrogène et de l'azote. Le rêve qui nous fait voir des mondes habités par des êtres vivants, dans la constitution desquels le carbone serait remplacé, par exemple par du silicium ou par du titane, tombe dans le domaine

des improbabilités. Il est vraisemblable que la vie, transportée dans d'autres mondes habités, se complaît dans des formes qui doivent être apparentées de près à celles de notre globe.

Nous arrivons donc aussi à cette conclusion que la vie est sans doute obligée à un recommencement perpétuel. Partant des formes les plus inférieures, elle doit parcourir toutes les étapes du développement progressif, absolument comme l'individu, si richement organisé qu'il soit, a pour point de départ une cellule élémentaire.

Toutes ces conclusions s'accordent admirablement avec ce qui, sur la terre, caractérise la vie. On ne saurait se refuser à admettre que, sous cette forme, la doctrine de la panspermie se distingue par une grande harmonie, ce qui est une des meilleures pierres de touche pour la vérité probable d'une doctrine cosmogonique.

Il est peu probable que la justesse de cette doctrine puisse jamais être prouvée directement par l'examen des germes que l'air nous apporte et que nous pouvons recueillir. Les germes qui arriveraient jusqu'à nous, originaires d'autres corps célestes, sont extrêmement peu nombreux. La surface entière de la terre n'en recueille sans doute que quelques-uns par an. Ils ressemblent d'ailleurs probablement beaucoup aux spores monocellulaires d'origine terrestre, qui remplissent l'air en quantités innombrables, et que le vent disperse dans toutes les régions. L'origine « céleste » d'un germe sera difficile sinon impossible à démontrer, même si, contre toute probabilité, quelqu'un d'entre eux devenait l'objet d'une découverte fortuite.

Sources et licence

Texte : https://fr.wikisource.org/wiki/L%E2%80%99%C3%A9volution_-des_mondes. Domaine public ; transcription Wikisource CC BY-SA 4.0. Mise en forme : liregratuitement.com. Tout ce que nous ajoutons reste libre.