

René BIED-CHARRETON

DE
LA TURBINE
A L'ATOME

PRÉFACE
de M. Charles FABRY
MEMBRE DE L'INSTITUT

Librairie-Imprimerie GAUTHIER-VILLARS
55, Quai des Grands-Augustins, 55 -- PARIS (6e)
1933

BIED-CHARRETON.
DE LA TURBINE A L'ATOME.

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation
réservés pour tous pays.

BIED-CHARRETON.
DE LA TURBINE A L'ATOME.

PRÉFACE.

Le livre de M. Bied-Charreton, où l'on trouvera un exposé clair et solide de quelques-unes des grandes questions qui occupent les techniciens et les physiciens, aurait pu s'intituler : Questions de physique vues par un ingénieur ; le titre que l'auteur a choisi et l'ordre dans lequel il présente les questions montrent assez que c'est par la technique, en suivant une pente naturelle, qu'il arrive à la Physique. C'est en regardant l'intérieur d'une chaudière à vapeur qu'il nous conduit à l'évidence de la théorie cinétique des gaz, à la réalité des molécules et à la constitution de l'atome. Il faut lui savoir gré d'avoir montré au lecteur le chemin parcouru et de lui servir de guide toujours sûr pour aller des vérités tangibles de la technique aux lois cachées de la physique atomique.

Et cependant, avouerai-je que j'ai ouvert ce livre, pour la première fois, avec un peu d'inquiétude. Les physiciens professionnels ont une tendance à se méfier quelque peu de la science vue par les ingénieurs, et ce sentiment est basé non pas sur une idée préconçue mais sur une expérience maintes fois répétée. Combien de fois n'a-t-on pas entendu un technicien, parfois éminent, annoncer qu'il allait démontrer, en paroles ou par écrit, « l'erreur grossière de Newton » ou « l'absurdité des idées d'Einstein » ou « l'ineptie de Maxwell », ou encore décrire d'une manière définitive « la constitution de l'éther » ! Cette confiance en soi, faite de beaucoup d'ignorance et de naïveté, cette mégalomanie intellectuelle, s'expliquent chez des hommes habitués à lutter contre la matière, c'est-à-dire avec un adversaire qui se défend, parfois cruellement, si l'on se trompe. Transportés dans le domaine des idées, ils ne trouvent plus devant eux aucune des résistances passives qui les retiennent dans l'action, leur moteur intellectuel privé de frein s'emballe et les conduit tout droit à l'absurde, parfois au grotesque. De là, je pense, cette étrange explosion de bizarreries dans le domaine scientifique, qui chagrine les esprits pondérés.

J'ai eu l'agréable surprise de trouver au contraire, dans le livre de M. Bied-Charreton, un exposé correct, souvent original, de quelques-unes des grandes questions auxquelles personne ne peut demeurer indifférent. L'industrie, la science, certaines questions du domaine économique qui sont plus que jamais d'actualité, s'y rencontrent d'une manière intéressante ; j'ai pris grand plaisir à en lire l'exposé, et il en sera certainement de même pour plus d'une catégorie de lecteurs.

Ch. FABRY.

BIED-CHARRETON.
DE LA TURBINE A L'ATOME.

ÉNERGIE INDUSTRIELLE

HOUILLE BLANCHE

Soir d'une course en montagne. C'est l'heure de la halte dans les hauts alpages à la limite des glaciers et des champs de neige dont les masses nous surplombent en amphithéâtre. Le silence absolu des sommets n'est troublé que par la grande rumeur des eaux qui s'échappent de la base des glaciers, des champs de neige, se répandent en mille filets, courent suivant la plus grande pente, se rassemblent deux à deux, puis se fondent dans le thalweg, en la masse dont nos yeux suivent au loin la ligne blanche d'écume.

Laissons notre regard s'attarder sur cette eau qui descend en bondissant de roche en roche pour se précipiter d'un saut dans la gorge où le torrent gronde. Cette eau travaille, comme travaille le poids de l'horloge qui descend en faisant mouvoir les aiguilles. Depuis des milliers d'années, elle accomplit, en descendant des glaciers jusqu'à la mer, les travaux d'usure et d'entraînement des roches dont le résultat final est le modelé de la vallée.

Poursuivons le rapprochement entre la masse d'eau du torrent et le poids de notre horloge. De même que nous remontons celui-ci parvenu en fin de course, en lui communiquant une certaine quantité d'énergie qu'il dépensera ensuite pour faire marcher l'horloge, de même l'eau du torrent, parvenue à la mer, y est reprise par le Soleil qui l'évapore et la remonte dans les régions supérieures de l'atmosphère. Précipitée ensuite partiellement sur les hautes montagnes, cette eau s'y fixera à nouveau en réserve sous forme de neige et de glace.

L'énergie que dépense le torrent dans son travail d'érosion, c'est donc une parcelle de l'énergie calorifique du Soleil, mise en réserve dans les glaciers et les neiges éternelles de nos montagnes. Nous saisissons ainsi le nom de « Houille blanche » que l'homme a donné à ces éblouissantes réserves d'énergie solaire, le jour où il a entrepris de les asservir directement à ses fins, par analogie avec les noires réserves de cette même énergie qu'il puise sous le nom de houille dans le sein de la terre où dorment, depuis des millions d'années, les débris carbonisés des forêts englouties dans les marécages de l'époque primaire.



BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Nous venons de prononcer le mot d'énergie.

Depuis l'immense développement pris par l'activité industrielle, ce mot a franchi les limites du sens presque exclusivement moral que lui attribuaient nos ancêtres, pour trouver un emploi extrêmement étendu dans le vocabulaire scientifique et industriel ; il a pris sa place jusque dans le nom de certaines grandes firmes. Dans ce champ nouveau d'emploi, ce beau mot a conservé son sens précis hérité des Grecs : c'est toujours la somme des efforts physiques et moraux, des travaux de toutes sortes qu'est capable de fournir un homme, un être vivant, un système physique quelconque. Laissons au-dessus de notre sujet l'énergie vitale, et très au-dessus encore, dans le domaine des âmes, l'énergie morale, l'énergie de la foi qui transporte les montagnes. Arrêtons-nous à leur sueur inférieure, l'énergie du monde physique que contenait la nébuleuse primitive et qui, d'après le principe de la conservation de l'énergie (rien ne se perd, rien ne se crée), s'est transmise intégralement jusqu'à nous.

Cette énergie, qui se manifeste à nous sous la forme des forces physiques et chimiques au sein desquelles nous vivons, les savants et les philosophes en poursuivent depuis toujours le secret de leurs investigations acharnées, en même temps que le secret de la matière.

La clé de ces grands secrets se trouve au sommet des sciences physiques, sommet inaccessible peut-être, et dont les flancs s'escarpent terriblement vers les hauts. Les grimpeurs qui escaladent cette cime ont progressé depuis quelques années par bonds rapides et d'une rare audace. Bien haut déjà, nous les apercevons dans les parages vertigineux de la physique mathématique, s'aventurant hardiment sur des arêtes aériennes, quittant parfois une voie sans issue pour une autre, mais avançant toujours en dépit des obstacles grandissants, vers le mystérieux et peut-être encore bien lointain sommet.

Le dernier venu parmi ces chercheurs découvrira-t-il un jour, tout là-haut, l'unité de la matière et de l'énergie sous la forme d'une vibration ?

Ascension difficile mais belle entre toutes ! Tenterons-nous un jour de partir sur les traces de ces grimpeurs à la recherche du secret intime des objets familiers qui nous entourent et des forces qui les animent ?



La voix du torrent nous tire de la contemplation des hautes cimes et rappelle notre attention sur la parcelle d'énergie dérobée au Soleil qu'il gaspille splendidement à nos pieds.

En dehors de la houille noire, véritable concentré d'énergie solaire enfoui dans le sein de la Terre, la nature ne recèle-t-elle pas mille autres parcelles de cette même énergie qu'elle tient à notre disposition sous les formes les plus variées ?

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Les forêts qui commencent dans le ravin et couvrent au loin la montagne et la plaine nous apportent une source ancestrale de combustibles dont toute l'énergie calorifique est empruntée au Soleil qui les fait croître.

Plus bas dans la plaine, ce torrent devenu rivière recevra les eaux de pluie ruisselant des collines qui encadrent sa vallée et se trouvera ainsi enrichi d'une nouvelle parcelle d'énergie solaire.

Tout là-bas sur la mer, le vent qui souffle dans les voiles tire sa force de l'échauffement inégal de l'atmosphère par le Soleil.

Plus loin encore, les gisements pétrolifères n'ont-ils par leur origine dans l'énergie calorifique du Soleil sous les ardeurs duquel se sont développés, au printemps géologique, les êtres pélagiques dont la décomposition a donné l'huile précieuse ?

L'homme enfin n'a-t-il pas tenté l'utilisation directe de la chaleur solaire ?

Une est donc bien l'origine des sources d'énergie physique auxquelles puise toute notre activité. Mais il s'en faut de beaucoup que toutes ces sources aient pour nous la même valeur d'utilisation.

Les sources d'énergie accumulée sous forme de matière transportable s'offrent comme particulièrement précieuses, surtout lorsque, comme la houille et le pétrole, elles possèdent un très grand pouvoir calorifique. Avec une docilité absolue, elles nous livrent l'énergie qu'elles contiennent accumulée, à l'heure et à l'endroit où nous en avons besoin et dans les quantités nécessaires.

Aussi de quel pillage ces sources d'énergie ont-elles été l'objet dès leur découverte ! De 15 millions de tonnes en 1800, l'extraction de la houille passe à 130 millions en 1860, 770 en 1900 et franchit le milliard en 1913 : c'est la curée.

En un rêve nous apparaît la silhouette de tant de cités industrielles d'hier et d'aujourd'hui encore forêt de cheminées, volutes opaques de fumée couvrant au loin le ciel d'un voile de charbon comme un nuage volcanique, lueurs d'incendie, atmosphère trouble et pénible, maisons au regard noir et triste.

Le visage de ces cités s'éclaircit d'un sourire au début de notre siècle. Sous la pression des nécessités économiques, la pratique aveugle recule pas à pas devant la méthode ; l'usine se rapproche du laboratoire et le savant de l'ingénieur ; la chasse au gaspillage du précieux combustible s'organise sous le contrôle d'une comptabilité nouvelle, celle des calories.

Mais longue semble encore la route à parcourir pour que le bel « or noir », avec toutes ses essences précieuses soit mis à l'abri de tout abus et de l'épuisement prématuré.

Même assaut sur le pétrole avec une menace d'épuisement encore plus rapide.

A l'encontre de ces minerais d'énergie solaire exposés aux dilapidations, les

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

sources d'énergie qui naissent directement du jeu des forces naturelles échappent à l'épuisement. Prêtons l'oreille à la brise du soir qui chante près de nous dans les mélèzes. Le charme sauvage de la voix d'Eole a bercé comme nous les premiers hommes. En dépit de tous les excès, elle bercera encore les derniers, s'il reste sur Terre un peu de poésie au crépuscule du monde. Mais sous sa voix enchanteresse, ce fils de Zeus dissimule de la malice et du caprice.

Ne fit-il pas présent à Odysseus d'outres qui renfermaient les vents contraires à sa navigation ? Les compagnons du héros, trop curieux ouvrirent, hélas ! ces outres d'où les vents s'échappèrent en furie et périrent dans la tempête à l'exception de leur subtil capitaine.

Et cependant une longue série de siècles a su obtenir d'Eole, par l'habileté de ses marins, la conduite de ses vaisseaux à travers les mers.

Goélettes gracieuses qui prenez le large de toutes vos voiles blanches, voiles latines de la Méditerranée, voiles bleues de Concarneau, voiles rouges de Douarnenez, hautes et fières voilures malouines et vous, derniers moulins à vent qui vous accrochez au sol de Bretagne et des Flandres, vous êtes les témoins d'un passé plusieurs fois millénaire qui a presque uniquement tiré des vents l'énergie motrice de ses vaisseaux et de ses industries terrestres !

Trop irrégulière, trop capricieuse, trop diffuse, cette grande force des vents s'est éclipsée au siècle dernier devant la toute puissance dominatrice de la houille noire, puis de la houille blanche. Mais la technique moderne, soucieuse de ne pas abandonner une source d'énergie gratuite, et à l'abri de tout épuisement, en a entrepris le rajeunissement. Déjà nous voyons s'élancer dans le ciel, dans quelques exploitations agricoles, ces légers moteurs éoliens, où l'acier a remplacé le bois et la toile et qui saisissent au passage le moindre souffle, de quelque côté qu'il vienne, pour produire un travail utile s'accommodant d'une marche irrégulière, comme d'élever de l'eau dans un château d'eau.

Tel est et tel restera sans doute encore bien longtemps le domaine des nouveaux moteurs éoliens, en dépit des essais de grande envergure tentés au Danemark et au Canada ; et chez nous, le Mont Ventoux verra-t-il un jour l'usine anémométrique dont le projet a été esquissé ?



Quittons les ailes d'Eole et rouvrons les yeux sur le splendide spectacle des neiges et des glaces qui nous entourent. La grande rumeur des eaux qui descendent, nous ramène à la houille blanche dont la pensée ne nous quittera plus. Ces eaux, nous les avons vues travailler librement à leur grande œuvre d'érosion millénaire. Voyons-les maintenant travailler sous la servitude de l'homme.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Il faut, pour cela, nous arracher au charme du soir dans les hauts alpages et reprendre notre marche le long du torrent en descendant la vallée. Voici qu'à l'entrée d'une gorge, le torrent se heurte à un barrage en maçonnerie de 15^m de hauteur qui s'appuie sur les deux rives rocheuses. Les eaux retenues derrière ce barrage forment un lac tranquille dans lequel vient mourir le courant tumultueux et au fond duquel se déposent les pierres, les graviers et les sables que le torrent a arrachés à la montagne et charriés dans sa course. Sur l'une des rives de ce lac aux reflets opalins, nous distinguons, tout près du barrage, l'entrée d'une galerie souterraine dans laquelle s'engagent en masse les eaux clarifiées. Une grille aux barreaux serrés arrête à l'entrée du souterrain les débris flottants, feuilles et branches d'arbres, que le torrent a entraînés. L'excédent des eaux que n'engouffre pas le tunnel franchit en cascade artificielle la crête du barrage et continue sa course libre en aval dans le lit du torrent. Dans le mur du barrage et aménagée près de la rive de la prise d'eau, une écluse fermée par une grande porte d'acier. Périodiquement le « gardien de barrage », qui habite un chalet de la montagne à proximité, ouvre cette porte pour faire une chasse : le lac se vide alors par le « canal de chasse » en une veine liquide massive qui entraîne les pierres et tous les dépôts accumulés au fond.

Reprenons notre course le long du torrent en suivant par la pensée le fil des eaux asservies qui ont pénétré dans la galerie souterraine. Cette galerie de 2^m,50 de diamètre, aux parois maçonnées et recouvertes d'un enduit lisse de ciment, s'engage dans la montagne suivant une pente très faible.

D'un tracé à peu près rectiligne, elle suit, dans la masse de la montagne, la direction générale du torrent dont elle néglige les sinuosités secondaires. De distance en distance, nous apercevons, sur les flancs du ravin, des cônes d'éboulis marquant les emplacements plus ou moins effacés des fenêtres intermédiaires par lesquelles le percement de la galerie a été attaqué, et qui ont été ensuite murées, une fois les travaux terminés. Pendant de longs mois, la montagne a retenti sourdement des coups de mine qui perçaient ses flancs de granit, tandis que les tronçons de galerie s'avançaient d'un mètre par jour environ, suivant des directions déterminées mathématiquement et se rejoignaient finalement en une seule galerie continue. Le silence et la solitude ont repris possession de ces lieux qu'anima un travail fiévreux.

Tandis qu'en descendant le ravin, le torrent s'abaisse par bonds, la galerie continue à cheminer presque horizontalement dans la montagne. Mais voici que le ravin s'élargit en un cirque où l'homme a trouvé l'endroit propice au travail des eaux asservies. A 300^m ⁽¹⁾ au-dessus du torrent, nous apercevons, plaqué contre la paroi rocheuse de la montagne, un ouvrage en ciment, sorte de petit fortin d'où sort un tuyau d'acier d'un mètre et demi de diamètre qui descend à pic le long de la paroi à laquelle il s'accroche par des massifs d'ancrage. C'est dans cet ouvrage que débouche la galerie souterraine après un parcours de 3^{km} dans la montagne. Les eaux, libérées un instant de leur joug à la sortie de ce canal en pression, reprennent leur niveau naturel dans une « cheminée d'équilibre », puis plongent à pic dans la « conduite forcée », ce tube d'acier que nous venons de voir et qui aboutit en chute presque verticale aux turbines placées en bas.

(1) Les chiffres cités dans cette description ne sont donnés qu'à titre d'exemple et pour fixer les

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

idées. Suivant les installations, ils varient, comme la disposition des ouvrages, dans de grandes proportions. C'est ainsi que la hauteur citée ici varie depuis 10^m pour les très basses chutes jusqu'à plus de 1000^m pour les très hautes chutes.

Suivons des yeux cette conduite forcée dans sa descente vertigineuse jusqu'au grand bâtiment d'architecture sobre mais soignée que nous voyons tout au bord du torrent et le long duquel elle vient mourir, en détachant quatre branchements qui pénètrent dans l'édifice. C'est par ces branchements que l'eau aboutit, sous la pression correspondant à ses 300^m de chute verticale, aux quatre groupes turbines-alternateurs qu'elle fait tourner et qui transforment son énergie hydraulique en énergie électrique.

Arrêtons-nous un instant au bord de ce cirque où, sous nos yeux, le torrent asservi donne la mesure de sa puissance. A chaque masse d'eau de 5^m³ qui, par seconde, pénètre là-haut dans la conduite forcée, correspond une masse égale qui, pendant la même seconde, sort en bas en faisant tourner les turbines. Tout se passe comme si, pendant chaque seconde successive, 5 tonnes d'eau tombaient de 300^m sur les aubes des turbines, en accomplissant le travail de les faire tourner.

Or, le grand mot de travail a pris place dans le langage scientifique, avec un sens précis qui permet de le mesurer. Ici, le travail accompli dans chaque seconde, par cette masse d'eau qui tombe, se mesure par son poids de 5.000^{kg} multiplié par la hauteur de 300^m dont elle descend, ce qui fait 1.500.000 « kilogrammètres ».

Que le lecteur très indulgent, qui veut bien nous lire, nous suive jusqu'au bout de ce pénible défilé mathématique. La « puissance » d'une machine n'est autre que le « travail » qu'elle peut accomplir en une seconde ; elle s'exprime habituellement en « chevaux-vapeurs », ces fameux CV auxquels la vulgarisation de l'automobile nous a familiarisés, et qui valent 75 kilogrammètres. Notre chute d'eau avec sa hauteur de 300^m et son débit de 5^m³ d'eau à la seconde, développe donc une puissance de 1.500.000 kilogrammètres divisés par 75, c'est-à-dire de 20.000 CV. C'est cette puissance hydraulique de 20.000 CV qui va se trouver, ici, transformée en puissance électrique, puis transportée, par ces trois câbles que nous voyons s'élançer, à 300^{km} de nous, avec un rendement d'environ 75 %.

Reposons-nous maintenant des chiffres et pénétrons dans le bâtiment auquel l'usage a donné son nom correct de « centrale », car c'est bien le cœur de toute l'installation. Dès l'entrée, nous sommes frappés par l'ordre et la propreté parfaite qui règnent partout avec un souci évident de coquetterie : carrelage étincelant, murs clairs et immaculés, éclairage éblouissant. Une douce chaleur repose de l'air extérieur glacé qui, le soir, descend des sommets : c'est la chaleur animale des quatre grands alternateurs qui s'alignent au milieu de la salle et qui tournent à 1.500 tours par minute, entraînés par leurs turbines. Les oreilles sont remplies d'une grande symphonie dans laquelle se mêlent la rumeur profonde des eaux dans les turbines, et le tétracorde aigu des alternateurs en pleine vitesse.

De chaque alternateur partent trois câbles de cuivre qui, par une galerie souterraine, transmettent l'énergie électrique au « tableau de distribution » dont le marbre, couvert d'instruments de mesure et de leviers de manœuvre, s'allonge au

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

fond de la salle. C'est dans la dangereuse cabine «haute tension» placée derrière ce tableau que les énergies électriques, produites par les quatre machines, se couplent entre elles et se transforment pour finalement quitter la centrale par les trois câbles qui s'élancent du pylône de départ.

Suivons du regard ces câbles qui franchissent tout droit la montagne, allongeant leur courbe gracieuse de pylône en pylône jusqu'à la ville lointaine à laquelle ils portent l'énergie de notre torrent. Là-bas tout est vie. Il est 6^h du soir : éclairage public et privé, circulation, travail dans les usines, fièvre des affaires et des plaisirs battent leur plein. L'énergie électrique réclamée par cette activité fiévreuse atteint son maximum. Ce grand appel d'énergie, nous le lisons sur le « wattmètre » dont l'aiguille enregistre à notre centrale la puissance électrique exigée par le réseau. Sur la bande qui se déroule, l'aiguille trace, en montant, une pointe accentuée.

C'est l'heure de « la pointe », bien connue et redoutée des chefs de centrales électriques. Grâce à l'action automatique de leurs régulateurs, les turbines s'ouvrent en grand pour absorber le maximum d'eau et développer leur plus grande puissance. L'appel des turbines se répercute jusqu'au barrage où la réserve d'eau constituée par le lac artificiel entre en jeu, aspirée par le souterrain. Le niveau de la nappe liquide baisse, marquant ainsi d'une trace visible dans ces lieux sauvages l'excès de vie de la grande cité lointaine. Ce niveau ne se relèvera qu'après « la pointe », lorsque vers 20^h, la fièvre tombera et la vie se ralentira pour tomber ensuite en sommeil.

Avant de quitter la centrale, jetons un coup d'œil sur le personnel de service. La grande salle est déserte, à part un surveillant qui observe attentivement les instruments de mesure, voltmètres, ampèremètres, indicateur de pression d'eau, et un aide qui surveille les turbines et les alternateurs, tâte les paliers et les organes sensibles, comme l'on tâte le pouls, et prend la température d'une personne en observation. Tous deux ont l'air de ne rien faire, mais ils vivent en perpétuel éveil, prêts à intervenir instantanément en cas d'incident.

La loi a réservé à juste titre une part importante de ces emplois à des mutilés de guerre ; mais on commettrait une erreur sérieuse en les classant parmi les sinécures pouvant être attribuées sans discernement. Le merveilleux agencement électrique et mécanique des centrales hydrauliques, qui règle automatiquement la marche de tous les organes de façon qu'à chaque instant la puissance développée se plie exactement aux besoins du réseau de distribution, n'exclut pas l'intervention d'une intelligence éclairée et expérimentée doublée d'un caractère bien trempé. L'ensemble des organes très complexes de cette modeste centrale est soumis en effet à des forces se chiffrant au total de 20.000 CV, à une tension électrique atteignant 100.000 volts, à des vibrations de haute fréquence, enfin à des à-coups parfois terribles dont la perfide fée Electricité réserve la surprise à ses adeptes avec la complicité des éléments.

Voici précisément que, pendant le cours de nos réflexions, le ciel s'est subitement couvert, achevant de faire la nuit complète dans le ravin. Des premières lueurs d'éclairs lointains dessinent la silhouette des montagnes. Au tableau de distribution, les aiguilles des voltmètres et des ampèremètres se prennent de

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

mouvements nerveux et anormaux ; les lampes de la salle, pâlisant à l'unisson, saluent chaque salve aérienne lointaine, comme si le courant électrique était aspiré sur les câbles par l'électricité atmosphérique. Très vite l'orage se rapproche et voici que les premiers coups de foudre directs encadrent la centrale si brillante tout à l'heure, et maintenant si modeste au milieu du grand et impressionnant spectacle de l'orage dans la montagne. Le réglage de l'artillerie atmosphérique se précise, et les grandes et étranges trajectoires nous aveuglent à droite, puis à gauche.

Ce n'est pas sans un léger frisson que nous voyons s'affronter devant nous les énergies électrique naturelle et artificielle, dans cette petite usine où il semble que tout soit combiné pour les amplifier. Notre esprit attend anxieusement je ne sais quelles manifestations violentes issues des dangereuses résonances possibles entre les deux grandes énergies en présence. Instinctivement, nous tournons les yeux vers le chef, comme les passagers dans la tempête se tournent vers le capitaine. Sommes-nous désarmés contre le coup au but tombant directement sur le bâtiment ou sur les grands câbles aériens qui transmettraient à la centrale la tension céleste et ses effets instantanément destructeurs ?

Rassurons-nous : le bâtiment a ses bons paratonnerres soigneusement entretenus ; la ligne aérienne a ses parafoudres prêts à dévier vers l'eau du torrent le fluide atmosphérique auquel l'entrée est barrée. Rien à craindre si tous les organes protecteurs, bien conçus et réalisés, remplissent ponctuellement leur rôle ; mais ils ne l'accompliront que si le chef de centrale a lui-même accompli le sien en les surveillant et les entretenant sans défaillance. Conscience professionnelle ! Nous retrouvons donc cette sauvegarde primordiale à la base de la sécurité des usines hydro-électriques, comme nous l'avons déjà trouvée à la base de la sécurité des chemins de fer.

Mais voici le deuxième acte. Ebranlées par les décharges électriques, les lourdes nuées se sont résolues en cataractes ; et les versants de la vallée, vite saturés d'eau, déversent au torrent le débit décuplé de leurs ruisseaux et de leurs cascades. Démesurément grossi, le torrent s'élance à l'assaut du barrage contre lequel il précipite les roches et débris de toutes sortes qu'il a arrachés aux flancs de la montagne. Le beau lac aux eaux bleues, dont nous avons admiré tout à l'heure le miroir tranquille, s'est transformé en une masse boueuse et tourbillonnante qui se déverse en cascade épaisse par-dessus le barrage.

L'oeuvre de l'ingénieur qui a conçu, calculé et construit le barrage, subit en cet instant la sérieuse épreuve de réception que lui imposent les éléments. La pression statique de l'eau contre le barrage se double de la pression dynamique due à la vitesse du courant. Les tourbillons affouillent les fondations. Des questions se posent à l'esprit. Le barrage a-t-il été bien calculé pour résister à ces efforts ? Ses parois sont-elles bien étanches pour empêcher l'eau de s'infiltrer dans la maçonnerie et de la soulever de ses assises ? Ses fondations reposent-elles partout sur la roche vive ? Les rives rocheuses ont-elles été convenablement décapées de leur carapace fissurée pour appuyer les ailes du barrage à la roche saine ?

Le long canal souterrain, soumis à une pression doublée, subit, lui aussi, dans le

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

cœur de la montagne l'épreuve des éléments. Est-il partout creusé dans la roche stable à l'abri des glissements et des dislocations ? A la traversée de quelque vaste grotte dont le pic du mineur a violé le secret millénaire, le tunnel a-t-il été assez solidement armé pour résister au choc soudain des cascades souterraines ? La conduite forcée, que nous voyons suspendue à pic au flanc de la montagne, est-elle ancrée sur terrain stable et a-t-elle été convenablement calculée pour résister aux dangereux coups de bélier ?

En un mot, dans la conception de tous ces ouvrages, la science et l'expérience du géologue et de l'ingénieur ont-elles bien tout prévu ? Et dans leur réalisation, la conscience professionnelle des exécutants a-t-elle été à l'abri de toute atteinte ? Sur ces deux questions repose la sécurité de toute cette belle installation.



L'orage est passé aussi vite qu'il est venu. Laissons-nous tenter par la clarté de la Lune à son plein et escaladons de nouveau la montagne jusqu'aux grandes solitudes qui dominent la vallée. Nous découvrons bientôt le spectacle inoubliable des grands glaciers et des champs de neige éclatants de blancheur et sur lesquels la Lune découpe l'ombre opaque des sommets.

La grandeur du tableau qui s'offre à nos yeux a quelque chose d'éternel. Il semble que depuis toujours ces mêmes glaciers et ces mêmes névés, suspendus aux sommets, tels que nous les voyons, aient donné naissance au même torrent, et que celui-ci, se précipitant dans le même ravin, ait offert à l'homme la même énergie disponible depuis des millions d'années.

Une observation un peu attentive montre que cette immobilité n'a pas plus de réalité que celle des aiguilles d'une horloge. Les longues moraines qui prolongent le glacier à sa base sont les témoins de son recul. Celui-ci est parfois assez rapide pour qu'entre deux visites espacées de quelques années, l'œil le moins averti soit péniblement frappé de l'amoindrissement du beau glacier. Et si à nos yeux profanes se substitue le regard averti du géologue, les traces du recul se prolongent bien au delà des moraines que nous apercevons au pied du glacier. Elles se continuent sous cet alpage dont l'herbe recouvre une très ancienne moraine consolidée depuis des siècles ; elles se voient sur ces parois rocheuses polies et striées qui, plus bas dans les gorges et sur les flancs de la basse vallée, portent la trace du frottement et de la pression des glaces. Elles se découvrent encore beaucoup plus loin sur ces collines qui prolongent la montagne vers la plaine et dans lesquelles les carrières mettent à nu les moraines que le glacier a abandonnées jusqu'à des centaines de kilomètres au delà des monts, lors des grandes extensions glaciaires.

Eh quoi ! Le beau glacier tout gonflé de glace vive qui brille devant nous n'est-il qu'un des derniers et infimes débris alpestres d'une immense nappe glaciaire qui s'est allongée jusqu'à Lyon où elle a laissé, comme témoin de son invasion, le bloc

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

erratique que les Lyonnais vénèrent au sommet de la Croix-Rousse ? Mais alors la houille blanche, ce dernier réservoir d'énergie sur lequel nous fondons tous nos espoirs, est-elle aussi à son dernier stade d'épuisement, et les immenses travaux auxquels s'exerce le génie humain pour harnacher les torrents de nos montagnes sont-ils voués à ne servir que quelque cent ans tout au plus ?

Il en serait réellement ainsi si les glaciers étaient la source unique de nos cours d'eau de montagne. Nous savons heureusement qu'il n'en est rien. Ceux-ci trouvent dans la fonte des champs de neige permanente qui se reconstituent annuellement sur les sommets, ainsi que dans la fonte des neiges d'hiver qui pendant six mois couvrent la montagne d'un grand manteau jusqu'à l'altitude 1.500^m, leur apport d'eau peut-être le plus important. Enfin, les cours d'eau de la montagne sont, comme les rivières de plaine, alimentés directement par les pluies qui tombent sur les versants de leurs bassins, ruissellent en surface, ou courent sous terre, jusqu'à leur lit.

Un cours d'eau de montagne participe donc à la fois du régime glaciaire et du régime pluvial dans une proportion qui varie suivant que la plus grande partie de son bassin est entourée de hautes montagnes ou non. Dans le premier cas, ses hautes eaux sont en plein été, au moment où la pleine ardeur du Soleil s'attaque à la glace vive et aux névés des hauts sommets. Dans le deuxième cas, les hautes eaux coïncident avec la fonte des neiges de printemps et avec les mauvais temps d'automne ; entre les deux crues, la rivière subit deux « étiages », dont le plus bas correspond aux froids vifs du cœur de l'hiver.

Suivant la situation géographique de chaque cours d'eau, celui-ci dispense donc avec largesse l'énergie qu'il tient du Soleil, soit au cœur de l'été, soit au printemps et à l'automne. Durant les autres saisons, s'intercalent des périodes de restrictions plus ou moins accentuées et prolongées.

Nous touchons ici du doigt un des caractères essentiels de la houille blanche : son irrégularité. Toute usine hydraulique a donc, suivant la saison et les conditions météorologiques, une puissance variable à laquelle l'exploitant doit se plier en s'organisant pour l'utiliser au mieux : difficulté sérieuse, semble-t-il.



Nous pouvons maintenant nous rendre compte des études approfondies auxquelles doit se livrer l'homme d'action qui songe à tirer de la houille blanche l'énergie nécessaire à ses desseins. La puissance de son usine hydraulique dépendra, nous le savons, de la hauteur de la chute et de la quantité d'eau qu'il pourra capter. Pour obtenir la puissance qui lui est nécessaire, il peut avoir en vue soit une haute chute à faible débit, soit une basse chute à grand débit, soit une combinaison intermédiaire de hauteur et de débit donnant le même produit.

La prospection des gisements de la houille blanche comporte donc deux séries de

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

recherches et d'études. La première fait appel à la science du météorologue et du géographe : c'est l'étude hydrographique des bassins des cours d'eau qui se prêtent à l'aménagement des chutes utilisables. Cette étude longue et minutieuse échappe complètement aux possibilités des particuliers. Aussi, dès le début du grand essor de la houille blanche, à la fin du siècle dernier, a-t-on compris la nécessité de la confier à un service d'Etat, qui prit le nom de « Service des grandes forces hydrauliques » et fut rattaché au ministère de l'Agriculture. Ce service, créé dans des conditions d'économie idéales, puisqu'il ne possède aucun personnel propre et est assuré par des ingénieurs et fonctionnaires de différents services, en plus de leurs fonctions normales, poursuit depuis plus de trente ans la reconnaissance approfondie du régime de tous les cours d'eau des Alpes et des Pyrénées et de leurs bassins fluviaux. Le compte rendu de ses travaux, publié périodiquement, constitue, sous son écorce rébarbative de chiffres et de graphiques, un inventaire remarquable de nos richesses hydrauliques nationales. Le débit de chaque cours d'eau utilisable, mesuré à des « stations de jaugeage » convenablement choisies, a été étudié en rapport avec l'étendue du bassin versant, la quantité de pluie annuellement tombée, la surface glaciaire et enfin l'étendue du boisement.

On fut ainsi amené à approfondir l'influence capitale de l'arbre sur le régime des eaux. On connaissait déjà son grand rôle régulateur qu'une active et intelligente propagande pour le reboisement a vulgarisé jusque sur les bancs de l'école. Il n'est plus un écolier de France qui n'ait appris le respect de l'arbre, protecteur contre les inondations, les avalanches, les éboulements, les sécheresses, plus une région tristement dénudée où l'effort méthodique de nos services forestiers n'ait entrepris la patiente renaissance de la forêt. Mais l'arbre n'a-t-il pas un autre rôle que celui de régulateur de ruissellement ? Profondément plongé dans le sol par ses racines et dans l'atmosphère par son feuillage, n'est-il pas le siège d'un échange hydraulique intense entre ces deux milieux ?

D'après une note présentée à l'Académie des Sciences, en décembre 1919, par M. Paul Descombes, les arbres provoqueraient, sans pluie, une abondante condensation des rosées et des brouillards. Certains cours d'eau, dont le bassin est bien boisé, débiteraient annuellement plus d'eau que n'y déversent les pluies et les neiges. En Californie où il ne pleut pas de juin à septembre, on aurait observé que les arbres ruissellent d'humidité, et les prairies restent vertes dans leur voisinage, au lieu de roussir comme en terrain découvert. Près du cap de Bonne-Espérance, sur la montagne de la Table que recouvre souvent une nappe de brouillard, l'idée est venue, à un observatoire météorologique, de fabriquer un arbre artificiel par un faisceau de baguettes et de joncs, et l'on aurait constaté que cet appareil soutirait à l'atmosphère, par condensation des brouillards, quinze fois la quantité d'eau provenant des pluies pendant le même temps.

De l'ensemble des études poursuivies sur ce rôle de l'arbre, capital pour la houille blanche, il résulterait que l'apport des eaux atmosphériques au sol dénudé serait augmenté de 156 % par le boisement normal et de 40 % par le simple embroussaillement. En concluant à la nécessité de reboiser au plus vite les montagnes, l'auteur de la note, s'attaquant aux ravages causés à la végétation par les troupeaux nomades, terminait sur cette curieuse et intéressante observation :

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Puisque le reboisement ne peut être instantané et que son effet hydrologique n'est pas immédiat, il y a lieu de retenir la leçon qui se dégage des expériences que l'Association centrale pour l'aménagement des montagnes a effectuées sur ses terrains d'expériences dans les Pyrénées et les Alpes : il suffit d'évincer pendant 5 ans les chèvres et les moutons étrangers, avec une dépense totale de 5 francs par hectare, pour faire reparaître des bois insoupçonnés, et pour embroussailler jusqu'aux rochers, sans privation ni gêne pour les habitants et leurs troupeaux.

Mais cette heureuse influence des forêts sur le débit des cours d'eau n'est pas universellement admise. Différents observateurs, tant en France qu'aux Etats-Unis, auraient constaté que la forêt, siège d'une évaporation intense, appauvrit les réserves en eau du sous-sol. Tel aurait été le résultat des observations faites en 1931 par les Services météorologique et forestier des Etats-Unis tant l'Etat de Colorado qu'en Californie méridionale.

Les échanges hydrauliques provoqués par la végétation entre le sol et l'atmosphère agiraient donc dans un sens ou dans l'autre suivant les régions, les essences d'arbres, la frondaison, le genre de boisement en taillie ou en futaie. Nos yeux se reportent sur la vallée alpestre admirablement aménagée qui étale sous nos yeux son décor harmonieux.

Aux flancs de la montagne les forêts d'épicéas font de grandes taches sombres sur la roche urgonienne dont la blancheur étincelle au clair de lune. Au-dessus d'elles, les alpages s'estompent en gris. Plus bas, on distingue les taillis de fayards qui plongent vers les fonds. Des arbres isolés s'accrochent aux moindres saillies des roches cristallines, de place en place, se détache la silhouette royale d'un épicéa centenaire.

Pendant les longs mois de sécheresse de l'automne 1920 à l'été 1921, alors que tant de rivières alpestres, moins encadrées de verdure, s'épuisaient en un filet d'eau entre leurs rives arides, le torrent qui coule à nos pieds continua à gronder joyeusement dans son berceau de verdure abondante et variée.

Toute cette végétation alpestre, dont la beauté et la richesse nous saisissent, fait donc partie de l'installation industrielle que nous venons de visiter.

La montagne bien boisée, puissant accumulateur d'énergie, nous en paraît encore plus grandiose et plus belle !



Puissance d'une chute : produit de son débit par sa hauteur. Nous nous sommes laissé entraîner à deviser longuement sur le premier facteur. Nous serons brefs sur le deuxième qui, tout droit, nous conduira à l'histoire de la houille blanche. Revenons à notre homme d'action qui cherche à utiliser les forces hydrauliques.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Le voici maintenant documenté sur le régime des cours d'eau qui peuvent l'intéresser. Il lui reste à les étudier au point de vue des possibilités d'y aménager, avec la sécurité technique et financière nécessaire, une chute lui donnant, par sa hauteur, la puissance qu'il recherche. C'est ici que rentrent en scène le géologue, l'ingénieur et enfin l'homme d'affaires. Il s'agit de scruter les bassins de tous les cours d'eau à débit suffisant, pour y découvrir des sites qui, par la nature géologique du terrain et leur heureuse disposition, se prêtent à l'aménagement de chutes d'un bon rendement.

Le début de cette prospection date déjà de près d'un siècle. Bien avant le grand essor de la houille blanche en 1895, et sans remonter aux petits moulins d'ancienneté féodale dont les roues rustiques sont une des caractéristiques les plus anciennes de nos paysages, de hardis précurseurs avaient marqué la route à suivre. Dès 1837, l'ingénieur français Fourneyron mettait au point la première turbine industrielle et installait dans le grand duché de Bade une chute de 112^m d'un débit de 70 litres à la seconde. En 1863, une première chute de hauteur moyenne est installée, à Uriage, dans le Dauphiné. La période de 1864 à 1873 voit l'aménagement en France, dans la vallée du Grésivaudan, des premières grandes chutes en conduite forcée, destinées à alimenter les papeteries qui se développent le long de cette belle vallée. C'est à cette époque que s'illustre le nom d'Aristide Bergès, un des plus hardis pionniers de la première heure, qui invente ce nom si symbolique de « houille blanche », resté attaché depuis lors aux grandes forces hydrauliques.

Viennent ensuite, de 1870 à 1885, les grandes découvertes électriques avant lesquelles la houille blanche ne pouvait avoir son heure. Dès que les génératrices et moteurs électriques de grande puissance eurent fait leur apparition, lorsque surtout Marcel Deprez eut montré comment l'on pouvait transporter l'énergie électrique au loin, la houille blanche prit son envolée. 1895 marqua le début du grand essor. On vit alors les « chutards », pareils aux chercheurs d'or, s'élancer en campagne à la prospection de ce nouveau et précieux minerai. Ce fut l'époque héroïque. On fouilla avec fièvre les hautes et basses vallées, en s'attachant principalement aux cours d'eau non classés dans le réseau navigable ou flottable, et par conséquent libres de toute entrave administrative. Ce fut à qui mettrait la main le premier sur les plus belles chutes, les plus avantageuses par leur hauteur et leur débit, les plus faciles à aménager, les mieux situées pour l'utilisation de l'énergie produite.

Pour s'en assurer la propriété, on achetait vite les terrains nécessaires à l'assiette des ouvrages. On acquérait également des propriétaires riverains leur droit à l'usage de l'eau, autrement dit leurs « riverainetés » sur la partie du cours d'eau dont les eaux seraient dérivées. On accomplissait en même temps les formalités administratives, tout en poursuivant la mise sur pied du projet complet. Ce fut l'âge d'or de la houille blanche. Les industriels hardis qui surent, à la première heure, mettre en valeur les chutes d'un aménagement facile et économique s'assurèrent pour toujours l'énergie électrique dans des conditions qui paraissent maintenant invraisemblablement avantageuses.

On devine que la spéculation s'en mêla. Le prospecteur de chute se doubla vite d'un homme d'affaires. Une chute favorable étant trouvée, on achetait

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

rapidement, discrètement et à bon compte, les droits de propriété nécessaires à son aménagement, en se procurant ou non les autorisations administratives et l'on établissait un avant-projet sommaire. Puis on cherchait à vendre la chute à bon prix. On acheta et vendit ainsi des chutes, comme on achète et vend des terrains dans les villes-champignons du Nouveau Monde.

Pendant les premiers temps, les paysans de la montagne et les communes, propriétaires riverains des cours d'eau convoités, se laissèrent enlever à bas prix les quelques hectares de terrain, le plus souvent sans valeur intrinsèque, qu'on venait leur acheter, au fond des ravins pierreux par intermédiaires adroits. Ils cédèrent également, sans y regarder, les riverainetés dont ils n'avaient que faire dans les gorges sauvages traversant leurs domaines. Mais ils ne tardèrent pas à être avertis de la valeur de convenance des biens qu'ils cédaient ainsi pour rien, et beaucoup passèrent rapidement d'un extrême à l'autre. Les acheteurs, directs ou intermédiaires, de terrains et de riverainetés en vue d'usines hydrauliques, furent vite démasqués, et on leur tint la dragée haute pour ces terrains sans valeur intrinsèque, ces lits de torrents pierreux, ces pentes stériles qu'ils sollicitaient. Une spéculation nouvelle naquit, celle du « barreur de chute ». Certains propriétaires peu scrupuleux demandèrent des prix fantastiques pour l'achat de bandes de terrains indispensables à l'aménagement d'une chute. Le barreur de chute fut souvent un étranger au pays, qui, après avoir adroitement acheté à vil prix le sol indispensable, en exigea de l'industriel intéressé un prix qui avait le caractère d'une véritable rançon.

L'heure du législateur approchait. La spéculation menaçait, en effet, d'enrayer les progrès de la houille blanche dont les pouvoirs publics avaient mesuré l'intérêt national. La Grande Guerre mit subitement cet intérêt en évidence d'une façon tragique. La France, privée de ses principales sources d'énergie par l'envahissement ou la destruction des houillères du Nord et du Pas-de-Calais, se trouva du même coup en face de besoins décuplés. Seule la houille blanche pouvait nous fournir cette précieuse énergie sans recours aux charbons étrangers dont les sous-marins allemands menaçaient de nous priver d'un jour à l'autre, et dont la facture encore impayée pèse si lourdement sur notre économie nationale. Aussi, malgré la main-d'œuvre presque introuvable, les transports difficiles, l'augmentation des prix des matériaux, le resserrement des crédits, la Grande Guerre, au lieu de ralentir l'essor de la houille blanche, ne fit que l'accélérer. Pendant les sombres journées de 1915 à 1918, on assista à ce spectacle imprévu et reconfortant de sociétés industrielles, réputées pour leur prudence, engageant d'énormes capitaux et ouvrant des chantiers nouveaux qu'elles peuplaient d'ouvriers recrutés dans les milieux les plus variés. Les coups de mine creusant les souterrains et les fondations de barrages firent écho dans la montagne au bruit du canon; et en quelques mois de guerre, des chutes de 20 à 40.000 CV furent équipées et de suite utilisées dans les usines électrométallurgiques et chimiques, grandies et perfectionnées dans le même temps.

La victoire vint, enfin, et mit la France au premier rang des pays industriels d'Europe. Notre pays, plein d'espoir dans ses destinées, vit très grand. On parla d'outillage national, et, au premier rang de cet outillage, figurait l'aménagement des grandes forces hydrauliques, et en premier lieu de celles du Rhône.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.



L'heure du législateur avait sonné. Jusqu'en 1919, l'utilisation des forces hydrauliques s'était développée sans lois spéciales, et uniquement sous le régime législatif général des eaux courantes. Sur les cours d'eau non navigables ou flottables, c'était la pleine liberté. Sur les autres, qui constituent le domaine public inaliénable de l'Etat, c'était, au contraire, le régime très étroit des concessions ou permissions d'usage, précaires et révocables, à durée limitée, avec redevances fiscales. Cette dualité de régime avait déséquilibré la répartition des usines, qui s'étaient portées de préférence sur les cours d'eau libres d'entraves administratives et de charges fiscales, laissant inutilisées de belles et grandes chutes du domaine public.

Il fallait supprimer les graves obstacles résultant du caractère précaire des concessions sur le domaine public. Il fallait aussi mettre une fin à la spéculation des barreaux de chute dont l'audace croissante menaçait le développement des usines. Il fallait, enfin, donner à la houille blanche un statut légal uniforme sur tous les cours d'eau de France. Telles furent les bases de la loi du 16 octobre 1919 « relative à l'utilisation de l'énergie hydraulique ».

L'idée directrice du législateur est nettement définie par l'article premier de la loi « Nul ne peut disposer de l'énergie des marées, des lacs et des cours d'eau, quel que soit leur classement, sans une concession ou une autorisation de l'Etat.... » Un droit formel de propriété est donc reconnu à l'Etat sur les forces hydrauliques prises dans leur sens le plus large, puisqu'elles comprennent l'énergie des marées. Houille blanche, houille verte, houille bleue sont assimilées à la houille noire, et le régime des mines leur est appliqué. Dans quelles conditions ? L'article 10 nous fixe :

Le cahier des charges détermine notamment :

5° La durée de la concession qui ne peut dépasser soixante-quinze ans....

11° Les terrains, bâtiments, ouvrages, machines et engins de toute nature constituant les dépendances immobilières de la concession et qui, à ce titre, doivent faire gratuitement retour à l'État en fin de concession, francs et quittes de tous privilèges, hypothèques et autres droits réels.

Les droits de l'État s'étendent donc sur l'ensemble de ces travaux imposants que nous avons visités ce soir : barrage, souterrain, conduite forcée, usine et machines, que, dans moins de soixante-quinze ans, les hommes hardis qui les ont réalisés de leurs capitaux devront remettre à l'État au titre de retour qui nous laisse rêveurs.

Nous n'essaierons pas de mettre en balance les avantages incontestables que la loi du 16 octobre 1919 confère aux concessionnaires de forces hydrauliques,

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

notamment en mettant une barrière aux agissements des barreaux de chute, avec les lourdes charges qu'elle leur impose, tant comme durée limitée de concession et de propriété de leurs travaux que comme redevances fiscales et réserves d'énergie en faveur des communes et départements limitrophes, réserves qui peuvent atteindre le quart de la puissance de l'usine.

Constatons seulement que cette loi a marqué un changement profond dans l'histoire de la houille blanche. Les charges créées par ce texte se trouvèrent coïncider avec la hausse générale des prix de construction qui, maintenant encore, grèvent d'une manière si lourde l'établissement des usines hydrauliques.



Pendant ce temps, nous voyons la houille noire se défendre. Les chaudières et turbines à vapeur, les moteurs thermiques de toute sorte sont l'objet de progrès importants qui en augmentent sensiblement le rendement. Finalement, et en tenant compte des charges de toute sorte, le prix de revient industriel de l'énergie hydraulique s'est à peu près égalisé avec celui de l'énergie thermique. Un équilibre économique s'est donc provisoirement établi entre les deux grandes énergies en présence. Est-ce à dire que l'âge d'or de la houille blanche soit définitivement passé ? Non, car si dans les dernières années l'énergie thermique a su faire des progrès techniques très remarquables qui sont loin d'avoir dit leur dernier mot, l'énergie hydraulique, de son côté, a devant elle un champ d'améliorations extrêmement étendu que nous allons toucher du doigt.

Si l'on compare les éléments du prix de revient de l'énergie hydraulique et de l'énergie thermique, on constate que ces éléments sont à peu près les mêmes, sauf que, pour la houille blanche, il n'y a pas de combustible à payer, mais une installation hydraulique très importante dont la dépense est à amortir. L'élément essentiel du prix de l'énergie hydraulique est donc une charge de capital annuelle indépendante de la quantité d'énergie consommée. Qu'on en consomme peu ou beaucoup, la dépense totale annuelle est à peu près la même. Pour abaisser le prix de revient de la houille blanche, il faut, par conséquent, s'ingénier à en consommer le plus possible.

L'idéal serait donc d'avoir l'utilisation de toute l'eau qui passe dans le torrent, et de ne laisser déverser par-dessus notre barrage que juste la quantité d'eau prescrite par la loi pour ne pas l'assécher et permettre aux truites de remonter le courant. Mais nous connaissons la difficulté : elle réside dans l'irrégularité essentielle du débit des cours d'eau, variable du matin au soir et d'une saison à l'autre, irrégularité dont s'accommode très mal l'industrie qui exige une énergie régulière et exactement adaptée à ses besoins. L'abaissement du prix de revient de l'énergie hydraulique réside donc dans la régularisation du débit des cours d'eau.

Les ingénieurs de houille blanche se sont lancés dans cette voie avec leur

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

hardiesse habituelle. Pour constituer des réserves d'eau, ils ont construit des barrages dont la hauteur dépasse parfois 50^m et derrière lesquels se sont constitués des lacs immobilisant d'importantes masses d'eau. Ils ont entrepris l'utilisation des lacs naturels qu'ils sont venus chercher jusqu'à de grandes altitudes. L'exemple le plus remarquable est celui du lac de la Girotte, en Savoie, dont on a percé le fond pour en soutirer les eaux, et que, d'autre part, on alimente artificiellement en y déversant de l'eau pompée, en périodes de crues, dans le torrent qui coule en bas. C'est aussi par un agencement de barrages combinés que l'on régularisera l'énergie des marées à la première station marémotrice de l'Aberwrach, au fond de la Bretagne.

La lutte n'est donc pas finie entre houille blanche et houille noire. Mais peut-on parler de lutte ? C'est, au contraire, à une grande collaboration que nous assistons en ce moment. Entre les grandes centrales thermiques et hydrauliques qui s'établissent sur les gisements de houille noire, blanche, verte et bleue, s'établit un vaste réseau de lignes aériennes de transport d'énergie électrique qui réunissent tous ces centres de production d'énergie entre eux et avec les centres de consommation villes et groupements industriels. Sur ce réseau, les énergies s'échangent, s'ajoutent, se viennent en aide ; une vaste péréquation se fait. C'est la régularisation nationale des énergies grâce à la mise en commun de toutes ces énergies sous la forme électrique.

Arrêtons-nous sur cette vue de demain. Notre regard, en suivant les câbles qui s'élancent de pylône en pylône par-dessus la montagne, les a suivis jusqu'au pays entier qui travaille en connexion intime comme l'énergie qu'il consomme.



Cette fois, il se fait tard et il faut descendre. Vite sac au dos et dévalons en file indienne par le sentier qui mène à la -vallée. La Lune baisse et, sous les grands épicéas, l'ombre se fait plus épaisse. En silence, nous travaillons à assurer nos pieds sur les pierres qui roulent. Brusquement, nous débouchons enfin des grands bois, et dans ces lieux où la solitude et le grand silence nous étreignent, un cri de surprise nous échappe. Tout là-bas à nos pieds, de vives lumières piquent la vallée, dessinant des agglomérations et accrochant à ses flancs des constellations nouvelles. Au centre, une usine électrométallurgique, vivement éclairée, projette périodiquement au-dessus d'elle les grandes lueurs violettes de ses fours en coulée.

A la solitude qui nous oppressait, succède une impression de détente heureuse : la vie est là tout près. Voici que nous atteignons les premières lumières. Un bruit régulier nous arrête devant la croisée d'une maison vivement éclairée, qui illumine le chemin ; un coup d'oeil indiscret nous dévoile un métier du dernier modèle à moteur électrique, autour duquel plusieurs personnes veillent au travail familial. Le père est au métier d'où sort un fin tissu de soie.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Continuons notre chemin qu'éclairent maintenant des lampes électriques gaies et propres. Voici une ferme : la salle commune est éclairée d'une ampoule centrale dont la lueur fouille les recoins autrefois ténébreux, y dévoile l'antique saleté et l'en chasse avec les germes de maladie.

Il est minuit lorsque nous atteignons la place centrale de la petite ville au fond de la vallée. Las de notre longue journée, asseyons-nous sur la margelle de la gracieuse fontaine entourée d'arbres, qui en orne le centre, et goûtons le charme de ce décor d'autrefois rajeuni par la lumière intense. Deux lampes puissantes projettent leur vive clarté sur les vieilles et robustes maisons savoyardes qui encadrent la place, en dessinent les arcades, les saillants et les pignons, d'ombres nettes. Au centre, l'église et son cadran d'horloge éclairé, qui égrène lentement ses douze coups, pendant que la fontaine marque la fuite continue du temps, de son chant monotone.

Qui donc distribue cette lumière, fait revivre ce décor d'autrefois, actionne cette usine métallurgique ? Qui jette la clarté, la sûreté, la propreté, l'hygiène dans cette vallée et ses habitations autrefois si sombres ? Qui a attiré cette usine et a fixé autour d'elle la population du pays qu'on voyait autrefois émigrer ? Qui actionne le métier au foyer familial reconstitué dans le travail à domicile ? Qui a retenu, ramené et assaini la vie dans ces montagnes ? La direction des câbles électriques qui remontent tout droit vers notre usine hydraulique nous l'indique suffisamment. La montagne a retenu à elle ses enfants, de toutes ses forces hydrauliques. Vous paraît-il maintenant nécessaire de disserter longuement sur la portée sociale de la houille blanche ?



Non ! Mais en ramenant la vie dans les montagnes, la houille blanche y aurait-elle introduit la laideur, comme le déplorent un grand nombre de touristes, amis de la nature vierge et sauvage ? Un ingénieur de notre connaissance a retenu le propos indigné que lui tint une dame, à la veille de son départ dans les Alpes où il allait installer une usine électrique : « Alors, vous allez nous mettre des gros tuyaux dans la montagne ! » Le propos lui revint souvent lorsque ses tournées de surveillance le ramenaient devant la conduite forcée de 150^m qui s'accrochait comme un serpent au flanc de la belle vallée alpestre où était son usine. S'il eut au début quelques remords esthétiques lorsque les travaux de construction déchiraient la montagne, ces remords s'évanouirent lorsque les traces mêmes de ces travaux disparurent sous la végétation envahissante. Lorsque ne subsistèrent plus que les ouvrages définitifs encadrés d'une frondaison débordante, il se plut à les contempler dans le cadre du site auquel ils avaient été adaptés. Ce barrage, cette conduite forcée, cette usine mettaient en évidence à ses yeux la puissance du torrent ; et le symbole de cette puissance ne parvenait pas à déparer à ses yeux la beauté du site. Tout au contraire, il la complétait, et formait avec elle un tout inséparable, au même titre que les forces hydrauliques sont un attribut essentiel et inséparable de la montagne.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

La lèpre de la montagne, ce ne sont pas les gros tuyaux de la houille blanche, mais les pentes dénudées par les déboisements, ravagées par les troupeaux nomades, puis ravinées par les eaux et enfin s'éboulant ou glissant en masse. Il n'y a qu'un remède à ces dégradations qui donnent à la montagne un aspect de laideur désolée et sinistre, c'est le reboisement. Or, nous l'avons vu, le reboisement fait partie essentielle du programme d'aménagement de la montagne en vue de la régularisation des forces hydrauliques. La houille blanche collabore donc d'une façon indirecte, mais très efficace, à la reconstitution esthétique de la montagne.

Des actes de vandalisme sont toutefois possibles. La loi les a prévus en obligeant les concessionnaires des entreprises hydrauliques à soumettre à l'administration les conditions spéciales auxquelles devront satisfaire leurs ouvrages en vue de la préservation des sites et des paysages.



Dans le train qui nous emmène loin de la montagne, nous nous demandons où en est l'œuvre d'aménagement de nos forces hydrauliques. Consultons les statistiques : elles nous donnent la puissance totale des usines hydrauliques installées en France et dans le monde entier, depuis le grand essor de la houille blanche. En 1904, cette puissance totale était en France de 250.000 CV ; en 1914 de 750.000 ; en 1924 de 2.500.000. Nous venons au troisième rang, après les Etats-Unis dont la puissance hydraulique installée en 1917 dépassait 6 millions de chevaux et le Canada qui, en 1923, en alignait 3.300.000.

Que reste-t-il à faire chez nous ? Les études les plus sérieuses concluent à la possibilité d'aménager en France une puissance hydraulique totale de 9 millions de chevaux. L'œuvre accomplie jusqu'en 1924 correspond donc à plus de 27 % des réserves de notre pays en puissance hydraulique. C'est dans les Alpes, son pays natal, autour de Grenoble, sa capitale, que la houille blanche s'est d'abord développée et a pris la plus grande extension. Certains grands cours d'eau alpestres tels que l'Arc et la Romanche sont utilisés à pleine capacité. Lorsqu'on les suit en chemin de fer ou par la route, on voit les usines se suivre de telle sorte qu'en certains endroits le canal de fuite de l'une débouche presque à la prise d'eau de la suivante. L'étape restant à parcourir comprend, bien entendu, les chutes les plus difficiles, les plus coûteuses, mais aussi les plus puissantes ; et en tête de celles-ci figurent les chutes du Rhône.

A part deux usines de moyenne importance, l'une à la frontière suisse, l'autre en amont de Lyon, notre grand fleuve alpestre coule encore en toute sauvage liberté, à travers notre territoire. Nous lui abandonnons l'immense énergie évaluée au total de plus de 700.000 CV que l'on pourrait en tirer en une série d'usines dont la principale, complètement étudiée à Genissiat, barrerait le grand fleuve à sa traversée du Jura. L'importance des capitaux nécessaires à la construction de

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

cette usine dont la puissance dépasserait 200.000 CV, nécessitera la constitution d'un organisme national dont les statuts ont été mis sur pied. Il ne manque plus que l'argent, l'esprit de décision, la cessation des discussions byzantines et l'effacement des intérêts particuliers devant l'intérêt national. La France victorieuse ne trouvera-t-elle pas, dans sa force vive, les ressources nécessaires pour réaliser cet outil national qui lui éviterait l'importation d'environ un million de tonnes de charbon par an !

Telles sont nos dernières réflexions, tandis qu'en plein pays de houille blanche, la locomotive qui nous emmène brûle le bel « or noir » et toutes ses précieuses essences, et que nous suivons des yeux les eaux impétueuses du grand fleuve gaspillant, en vains tourbillons, l'immense énergie que nous lui abandonnons en pure perte.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

LES PRINCIPES DE CARNOT

La dernière crête des Alpes s'est évanouie dans le soir. Par instants, une lueur rougeâtre, tirant de l'ombre un coin de paysage, nous rappelle que le chauffeur chargeant du charbon dans le foyer de la locomotive, entretient dans ce foyer une source intense de chaleur.

Dans le sein de cette locomotive, une opération s'élabore donc devant nous d'une façon continue, dont les deux termes extrêmes se manifestent à nos sens : à l'origine, une source de chaleur entretenue par le bras du chauffeur ; à l'issue, la traction à 100^{kmh} des 500 tonnes de notre train.

Entre ces deux termes, source de chaleur et travail de traction, notre esprit, négligeant les organes de la machine dont le mécanisme lui échappe, pressent une relation générale qui les domine.

A cette même heure, des millions de machines dans le monde, au sein des navires, des centrales d'énergie, des plus petites comme des plus grandes usines, sur les automobiles, les avions et les trains, sont, par le jeu des mécanismes les plus divers, le siège de la même élaboration qui, d'une source de chaleur, aboutit à un travail.

Une question se pose impérieusement à notre esprit. Dans cette élaboration, qui tient dans notre vie moderne une place si importante, quel rôle joue la chaleur et que devient-elle ?

Se dissipe-t-elle entièrement sans se détruire ni changer de nature après avoir produit le travail que lui demande le mécanicien ? Ou bien, cette locomotive et toutes ces machines sont-elles réellement le siège d'une transformation effective de la chaleur en travail mécanique ?

Pour des hommes du xx^e siècle, pénétrés, comme nous le sommes, du principe de la conservation de l'énergie, la réponse ne peut faire de doute. Rien ne se perd, rien ne se crée, nous récrions-nous ! Notre locomotive n'est pas une fée ; elle ne crée pas de rien le travail qui nous emporte. Elle ne peut que le puiser sous une autre forme dans une source, et celle-ci ne peut être que la source de chaleur que le chauffeur entretient dans le foyer. Qu'est donc cette locomotive ? Que sont ces millions de turbines et de moteurs, sinon des machines à transformer de la chaleur en travail mécanique ?

Et cependant, cette transformation de la chaleur en travail et la transformation inverse du travail en chaleur, qui nous semblent si naturelles et qui constituent

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

une des pierres d'angle de l'édifice scientifique moderne, les hommes de science étaient, jusqu'au début du XIX^e siècle, dans l'incapacité de la concevoir.

Quel fossé séparait donc, sur ce point capital, la manière de voir de nos pères, de la nôtre ? Et par quelle révolution scientifique, contemporaine de la grande, ce fossé a-t-il été franchi, révolution sans laquelle la thermodynamique et, avec elle, toutes les sciences physiques modernes n'auraient pu prendre leur immense essor ?



Plus de vingt siècles se sont écoulés depuis que la question s'est posée pour la première fois. Écoutons en effet la voix de Platon qui vient jusqu'à nous :

« La chaleur et la lumière proviennent du Soleil; mais la chaleur peut être engendrée par le frottement et le mouvement. »

Plages harmonieuses de l'Hellade antique, auriez-vous entendu, parmi tant de dialogues surhumains, ébaucher les principes de la transformation réciproque de la chaleur en travail et du travail en chaleur et les fondements de la thermodynamique moderne ?

Puis la clarté s'obscurcit, et, sur cette aube prématurée, une nuit de mille cinq cents ans retombe, comme si le génie intuitif, trop vaste, des philosophes de la Grèce antique avait épuisé le potentiel scientifique d'une longue suite de générations.

Les premières lueurs d'un jour nouveau apparaissent en Angleterre dans la deuxième moitié du XVII^e siècle. En 1663, Edward Sommerset, devenu Lord Worcester, observe qu'un canon de fusil, presque complètement rempli d'eau et hermétiquement clos, fait explosion sous la pression de vapeur lorsqu'on l'échauffe fortement. Avec le génie pratique de sa race, Sommerset, sans s'arrêter au problème de science pure que soulève cette chaleur produisant un travail d'explosion, utilise de suite le phénomène pour construire une machine qui élève l'eau de la Tamise.

Avec le même sens pratique, et sans préoccupations scientifiques apparentes, nous allons voir notre compatriote, le populaire Denis Papin se faire, quinze ans plus tard, l'Edison de la machine à feu. Protestant, il s'expatrie, gagne l'Angleterre où il est accueilli, patronné par le physicien anglais Bayle et nommé en 1680 Membre de la Royal Society. Dans ses mains d'inventeur, les organes essentiels de la machine à vapeur vont prendre forme en quelques années.

En 1682, il décrit dans les Acta eruditorum sa fameuse marmite, renouvelée des Grecs. En 1690, il introduit un piston dans un cylindre, puis envoyant de la vapeur sous le piston, il obtient le mouvement de celui-ci. Avec cet organe, il

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

construit la doyenne des machines à vapeur, à la vérité bien rudimentaire, car il fallait en commander chaque mouvement à la main. Mais, plein d'audace, il voit de suite l'utilisation de sa machine ad naves adverso vento provehendas. En 1707, il équipe avec sa machine un bateau à roues ; comme il remonte la Fulda avec son bateau entre Cassel et Münden, la corporation des bateliers lui interdit le passage par l'écluse dans la Weser et détruit son bateau. Papin, qui voulait présenter son invention à la Royal Society, arrive à Londres les mains vides ; il ne reçoit aucun encouragement et meurt misérablement en 1714, laissant au berceau la machine à feu et le bateau à vapeur.



Vingt-deux ans après la mort de ce blaisois, auquel sa ville natale a justement érigé une statue, naît à Greenock, au fond des montagnes d'Ecosse, celui qui devait être son illustre continuateur. Avec James Watt, un grand pas va s'accomplir dans l'ordre scientifique.

Watt ! Ce nom familier, si évocateur de notre vie industrielle, n'est-il pas un nom commun désignant l'unité internationale de puissance et prononcé des milliers de fois par jour dans le monde entier ?

A quel titre le nom de ce highlander partage-t-il avec les Ampère, les Volta, les Coulomb, les Joule la consécration définitive d'être passé dans le vocabulaire technique de toutes les langues, et remplit-il de ses dérivés notre langage de tous les jours ?

Est-ce parce que, poursuivant l'oeuvre de Denis Papin, il a inventé le tiroir de distribution et réalisé le condenseur de la machine à vapeur ? Est-ce pour avoir mis au point, sous une forme vraiment industrielle, sa fameuse machine à balancier dont l'image a captivé, dans les vieux traités de Physique, notre imagination d'écoliers ?

Ces titres auraient été insuffisants à justifier pareille gloire scientifique si Watt n'avait été avant tout le premier à avoir l'idée de mesurer un travail, celui de la machine à vapeur, et à réaliser cette mesure au moyen d'un appareil indicateur qui porte son nom et qui a résisté à deux siècles d'épreuve.

Ce faisant, Watt introduisait la notion de mesure chiffrée et calculable dans l'étude des machines, transformait cette étude empirique en une science exacte et ouvrait la première porte à l'étude des relations entre la chaleur et le travail, c'est-à-dire à la thermodynamique.

Ainsi Pascal avait fait pour l'étude des pressions ; ainsi fera Lavoisier pour la chimie. Et tel est le prix que la science moderne attache au nombre que cette innovation valut à Watt la gloire scientifique de donner son nom à l'unité internationale d'énergie.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

« Toutes choses accessibles à la connaissance possèdent un nombre ; car, sans celui-ci, nous ne pouvons rien comprendre ni connaître. » Cette maxime d'un pythagoricien que M. Emile Picard rappelait, le 26 mai 1929, au centenaire de l'Ecole Centrale, est la clé de voûte des sciences physiques et chimiques et de toutes celles qui s'y rattachent. Ce n'est, semble-t-il, qu'au seuil du libre arbitre que le nombre perd son empire.



Après Watt et grâce à ses travaux, la machine à vapeur connue, au seuil du XIX^e siècle, une éclosion qui, toutes proportions gardées, rappelle celle de l'automobile cent ans plus tard. Laissons-la poursuivre son essor pour revenir au grand problème qui nous préoccupe, celui de la transformation de la chaleur en travail, que cette machine recèle.

A quelle étape, Watt a-t-il laissé la solution du problème ? Dans le triptyque, chaleur, pression, travail, dont sa machine était le siège, Watt avait bien noué la relation mathématique entre les deux derniers termes, pression et travail. Mais il ne put tirer de l'ombre la relation entre ces deux termes et le premier, c'est-à-dire tout le problème des rapports entre la chaleur et le travail.

Quel obstacle infranchissable arrêta donc Watt et tous les hommes de science de son temps au seuil de ce problème ? C'est qu'ils étaient sous l'empire de la théorie millénaire du calorique, substance indestructible, se conservant dans le monde en quantité immuable. Le calorique ne pouvant ni disparaître, ni se transformer, tout échange entre calorique et travail était inconcevable pour les plus distingués des esprits de ce temps.

Cependant des milliers de faits journaliers, des observations scientifiques précises auraient dû, semble-t-il, ouvrir les yeux.



1784. Un ancien soldat des guerres de l'Indépendance, Benjamin Thompson, comte de Rumford, né sur le continent américain, termine sa vie en homme de science et philanthrope au service de l'électeur de Bavière.

Rumford travaille dans une fonderie de canons. Son attention se fixe sur l'énorme quantité de chaleur produite pendant le forage des tubes. Enchaînés comme ils le sont au principe de la conservation du calorique, les techniciens de l'époque expliquent le phénomène en affirmant que la chaleur spécifique du métal en

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

masse est plus grande que celle du métal en copeaux, d'où ils concluent que le calorique mis en liberté doit bien apparaître sous forme sensible. Comme quoi l'on trouve toujours une explication quand il le faut.

Cependant, l'inanité de cette explication saute aux yeux de Rumford, car il observe que le simple brunissage par frottement dégage une grande chaleur sans enlever le moindre copeau. Rumford, faisant preuve d'une exceptionnelle indépendance d'esprit, flairé que la chaleur produite doit être due au frottement. Pour s'en assurer, il met sur un tour un gros canon de 6 en bronze dont la culasse frotte sur un foret d'acier dans un baquet rempli d'eau. Au bout de deux heures et demie, l'eau entre en ébullition. Cette expérience met Rumford à deux doigts de la révélation. On rapporte qu'il eut l'idée de rapprocher la quantité de chaleur produite de celle qu'aurait développée la combustion du foin mangé par les chevaux du manège qui faisaient tourner la pièce de bronze. Il touchait au but.

Mais telles étaient l'opacité et la solidité du bandeau que la théorie du calorique indestructible maintenait sur tous les yeux, que Rumford s'arrêta à un mètre du grand but. Il avait mesuré la chaleur d'un côté, le travail de l'autre ; il n'eut pas l'idée de les comparer ! Puissance anesthésiante d'une formule millénaire !



Mais les faits s'imposaient trop pour que la vérité tardât dès lors à éclater. L'idée de la transformation réciproque de la chaleur en travail et du travail en chaleur était dans l'air. Coup sur coup, la solution du grand problème se manifesta en France d'abord sous une forme philosophique, avec Sadi Carnot, puis en Angleterre, sous une forme expérimentale, grâce à Joule, et en Allemagne, sous une forme mathématique, grâce à Clausius.

Dans une séance solennelle tenu le 20 janvier 1926, sous la présidence du Président de la République, la Société des Ingénieurs civils a voulu célébrer le souvenir du jeune Français, dont les Réflexions sur la puissance du feu, publiées en 1824, condensèrent les principes fondamentaux de la thermodynamique.

Né en 1796 de Lazare Carnot, l'organisateur des armées de la République, Léonard-Sadi Carnot, reçu à 16 ans à l'Ecole Polytechnique, quitte l'armée pour s'adonner à des recherches pratiques dans le but d'accroître le rendement de nos machines à feu et de faciliter ainsi à notre industrie la lutte contre la concurrence anglaise. Pratique également avait été le point de départ de Lavoisier ; pratiques seront aussi les buts de Pasteur.

Le choléra de 1832, en emportant Sadi Carnot à l'âge de 36 ans, lui laissa juste le temps de donner sa mesure. Ses papiers furent brûlés par mesure d'hygiène ; un cahier de notes manuscrites, heureusement échappé, est aujourd'hui conservé aux archives de l'Académie des Sciences. C'est dans ce cahier et dans les

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Réflexions publiées par Carnot en 1824, « sur la puissance motrice du feu et les machines propres à développer cette puissance », que se trouvent exposés ses fameux principes.

Si les buts de Carnot furent pratiques, ses recherches eurent, au contraire, un caractère purement spéculatif et philosophique. Carnot raisonne sur les faits acquis ; ses grands points de départ sont d'abord l'impossibilité du mouvement perpétuel ou, comme il dit lui-même, « de créer de rien de la puissance motrice », ensuite la notion de réversibilité des machines supposées parfaites.

Carnot s'élève d'abord au-dessus de la machine à feu de son temps et entrevoit que la force motrice sera produite dans l'avenir par des moteurs de toute sorte. Puis, dominant toutes ces machines si diverses qu'il ne peut connaître, il énonce le principe général de leur rendement maximum :

« Le maximum de puissance motrice résultant de l'emploi de la vapeur est aussi le maximum de puissance motrice réalisable par quelque moyen que ce soit. La puissance motrice de la chaleur est indépendante des agents mis en œuvre pour la réaliser ; sa quantité est fixée uniquement par les températures des corps entre lesquels se fait en dernier résultat le transport du calorique. »

S'élevant ensuite au-dessus des applications pratiques à l'altitude de la science pure, Carnot se dégage enfin de la croyance millénaire à l'existence du calorique, matière indestructible, qui avait encore entaché d'erreur ses premiers travaux, et, posant le bandeau, il voit en pleine lumière le principe de l'équivalence de la chaleur et du travail qui doit révolutionner les sciences physiques :

« La chaleur n'est autre chose que la puissance motrice, ou plutôt, que le mouvement qui a changé de forme. C'est un mouvement dans les particules des corps. Partout où il y a destruction de puissance motrice, il y a en même temps production de chaleur en quantité précisément proportionnelle à la quantité de puissance motrice détruite. Réciproquement, partout où il y a destruction de la chaleur, il y a production de puissance motrice. »

A cet énoncé philosophique, Carnot, en véritable homme de science, doit ajouter la précision chiffrée. Il le fait au paragraphe suivant :

« D'après quelques idées que je me suis formées sur la théorie de la chaleur, la production d'une unité de puissance motrice nécessite la destruction de 2,70 unités de chaleur. »

C'est ce qu'en langage classique nous exprimons en disant que l'unité de chaleur (la calorie) entièrement transformée en travail fournit 370 kilogrammètres. Dix-huit ans plus tard, en 1842, Joule, par des expériences directes, vérifiera le chiffre de Carnot en le rectifiant à sa valeur définitivement admise de 425 kilogrammètres.

S'élevant enfin jusqu'aux hauteurs de la philosophie scientifique pure, Carnot pose le grand principe de la conservation de l'énergie, base essentielle de toutes les sciences et de toutes les philosophies scientifiques modernes :

BIED-CHARRETON.
DE LA TURBINE A L'ATOME.

« On peut donc poser, en thèse générale, que la puissance motrice est en quantité invariable dans la nature, qu'elle n'est jamais, à proprement parler, ni produite ni détruite. A la vérité, elle change de forme, c'est-à-dire qu'elle produit, tantôt un genre de mouvement, tantôt un autre, mais elle n'est jamais anéantie. »

L'élévation philosophique de ces textes, exposés en beau et clair langage de France, apparente Sadi Carnot aux premiers penseurs scientifiques de tous les temps.

Ce fut l'œuvre des Clausius, des Clapeyron, des Joule et d'une lignée de physiciens qui vient jusqu'à nous, de tirer de ces grands principes les conclusions expérimentales et mathématiques dont l'ensemble est devenu la science de la thermodynamique, et qui ont éclairé et fécondé d'une façon si profonde les sciences physiques et chimiques modernes.

Mais, avons-nous vu, ce n'est pas pour s'adonner à la science pure que Sadi Carnot avait quitté l'armée. Son but, essentiellement pratique et industriel, était d'accroître le rendement des machines à feu et de favoriser le développement de notre industrie.

Dans quelle mesure a-t-il atteint ce but ?

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

RÉALISATIONS MODERNES

Six heures du soir, à la grande Centrale électrique de Gennevilliers.

A 6^{km} de nous, le grand Paris, brûlant de fièvre, illumine le ciel d'une intense lumière diffuse, trop-plein de l'énergie qu'il dévore en pleine pointe du soir. Au cœur de l'usine, un grand tableau de marbre et au centre de ce tableau, parmi tous les ampèremètres, voltmètres, phasemètres, sur lesquels se lisent les caractéristiques du courant lancé sur Paris, l'aiguille d'un wattmètre oscille lentement devant une division graduée, et la petite pointe noire, qui se promène innocemment comme Guignol dans sa longue et étroite fenêtre blanche, va et vient autour d'un trait de la division au-dessus duquel nous lisons 250.000 kW (1).

(1) Le kilowatt, unité officielle de puissance en France depuis la loi du 2 avril 1919, s'est complètement substitué, dans la pratique à notre ancien cheval-vapeur pour tout ce qui concerne l'énergie électrique, à cause des relations numériques simples qui le relient aux autres unités électriques. Le kilowatt vaut à peu près 1 cheval 1/3.

250.000 kilowatts ! De quoi élever deux locomotives Pacific de 100 tonnes à 125^m de hauteur en une seconde ! Telle est l'énergie que, chaque seconde, Paris aspire par les câbles souterrains, gros comme des petits bras d'enfants, déposés par trois dans leur berceau de ciment sous la chaussée. De la grande Centrale, ils s'éloignent comme du cœur les artères ; de sous-station en sous-station, ils se ramifient en un réseau de plus en plus complexe pour finalement enserrer les tissus de la capitale en un écheveau capillaire inextricable qui a pour terminus la lampe 16 bougies du modeste foyer, comme le moteur 100 CV du rapide ascenseur.

250.000 kilowatts ! Mais ce n'est que la moitié environ de l'énergie que la capitale dévore en excès de lumière, mouvement, travail et plaisir. Une ceinture de centrales thermiques, Vitry-sur-Seine, Nanterre, Saint-Denis, Issy-les-Moulineaux où viennent d'être réalisés les derniers raffinements de la technique de la vapeur, complètent, avec Gennevilliers, le réseau qui alimente la grand'ville. Et ce n'est pas encore suffisant. Un gros appoint est encore demandé aux forces hydrauliques de la chute d'Eguzon, dans la Creuse, créée pour la traction du P. O. Sera-ce tout ? Le Rhône lui-même, lorsque les Français se seront enfin mis d'accord pour utiliser cette richesse nationale, ne jettera-t-il pas une partie de son énorme puissance dans le gouffre de Paris à 450^{km} de distance ?

A cette heure même, toutes les grandes cités du globe dévorent, comme Paris, l'énergie produite par quelques usines grandioses, strictement rationalisées, qui, progressivement, se sont substituées aux moteurs individuels des particuliers

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

pour la force motrice, au gaz pour l'éclairage et à une poussière de petits et moyens « secteurs », pionniers de la première heure de l'électricité et disparates comme mode de production et nature du courant distribué. Pendant le même temps, l'abaissement du prix de l'électricité, ses qualités de propreté et de sûreté, l'élévation générale du « standard » de vie, l'affluence des populations vers les centres importants décuplaient la consommation d'électricité dans les grandes villes. Les moyennes, puis les petites villes suivaient les grandes. Et voici qu'enfin, sur l'appel de la terre qui ne veut pas mourir, les réseaux des grandes centrales étendent dans les campagnes leurs lignes de distribution dont les trois câbles, portant de pylône en pylône le courant triphasé, prennent peu à peu leur place familière dans nos sites les plus reculés. Par vaux et collines, nous les voyons courir de fermes en villages dans le cœur desquels, avec la lumière et la force répandues à profusion, le pays attend d'eux qu'ils ramènent la vie.

Dix mille communes avaient déjà reçu en 1930 la bienfaisante énergie ; et au début de cette année, il ne restait plus que 10.450 communes sur 38.000 dépourvues de toute distribution.

Ainsi voyons-nous qu'à l'heure actuelle, de l'usine au fond des champs et jusqu'au cloître, toute vie physique, intellectuelle et spirituelle a un support matériel fait d'énergie électrique.

Et voici qu'également la vie générale de tous les pays nous apparaît comme suspendue à la marche d'un nombre de plus en plus réduit d'usines de plus en plus puissantes transformant les forces hydrauliques et les combustibles minéraux en énergie de forme électrique. Cette concentration des usines productrices d'électricité apparaît dans les statistiques officielles qui, pour l'année 1927, font ressortir, dans 39 départements, une diminution de 205.196 kW de puissance installée, malgré une augmentation totale de 110.752 kW pour l'ensemble du territoire.

Puissance de réalisation des principes centenaires de Carnot.... Victoire darwinienne de l'électricité sur tous les autres modes d'éclairage et de force motrice... Concentration progressive de la production de l'énergie électrique... Conséquences sociales de cette concentration... Suites difficilement mesurables de la destruction ou d'un simple arrêt prolongé d'une pareille usine....

Ces pensées nous effleurent confusément tandis que nous pénétrons dans les chaufferies de la grande Centrale. Une salle de 90^m de longueur que la perspective de deux longs alignements de façades en tôle d'acier étire en une longue « rue de chauffe » déserte. Derrière ces façades sombres et inertes, d'où sort un sourd grondement et qui sont les chaudières, jaillit l'énorme source de chaleur, point initial de la production de l'énergie électrique, premier terme du cycle chaleur-travail de Carnot.

Ceci, une chaufferie ? Sur le carrelage parfaitement net pas une poussière de charbon ! Et où sont les chauffeurs ? A peine quelques surveillants bien propres qui se promènent comme des agents, les mains derrière le dos, en regardant des manomètres et des diagrammes sur lesquels des aiguilles tracent des courbes. De temps à autre, l'un d'eux corrige un écart dans la courbe d'une pression, d'une

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

température, d'un niveau d'eau ou d'une composition de gaz de foyers, en manoeuvrant un volant de vanne. Puis, tout rentre dans le calme.

Du fond de notre mémoire surgit alors l'image toute fraîche de la chaufferie classique d'hier et d'aujourd'hui encore dans tant d'usines non évoluées et au fond de tant de navires. A la lueur des foyers dont les portes s'ouvrent à intervalles rapprochés, apparaissent en clair-obscur des torsos nus et des bras musclés qui, à larges mouvements, lancent le charbon à la pelle dans la fournaise profonde. Le parquet de chauffe est couvert de charbon tout-venant ou de briquettes que les soutiers approvisionnent et cassent à coups de marteau. Un violent courant d'air est aspiré par les portes des cendriers des grandes chaudières dont les lourdes masses cylindriques sont cloutées de gros rivets. L'aiguille du manomètre tremblote autour de la pression de 8kg par centimètre carré. Laquelle des deux visions est le rêve ? Ce tableau à la Rembrandt ou le manomètre qui, devant nous, dans cette salle propre et déserte, marque 25kg de pression ?



Mais où donc est le charbon et où sont les chauffeurs ? finissons-nous par demander à l'un des surveillants. Un geste nous montre d'énormes caissons suspendus au-dessus de nos têtes et que prolongent des gaines en tôle plongeant à pic vers la base des chaudières. Par ces longues manches, le charbon descend des caissons où des élévateurs automatiques l'ont accumulé par centaines de tonnes, puis s'écoule invisible et régulier sur ces sortes de tapis roulants dont nous voyons les extrémités tourner lentement au ras du sol, avec une musique monotone de dé clic. Sur chacune de ces grilles articulées qui s'avance d'un mouvement à peine perceptible et rappelle le caterpillar d'un char de combat, le charbon, venu de la mine calibré en fins morceaux, s'étale en couche uniforme et se voit entraîné vers la fournaise. Saisi dans cet enfer par la tempête d'air chaud qui monte à travers la grille, l'or noir brûle en rendant intégralement les 7.000 calories par kilogramme que le soleil des premiers âges a emmagasinées dans les forêts marécageuses de l'ère primaire. Le mouvement de la grille, le débit du charbon et l'afflux de l'air sont soigneusement réglés de façon qu'à son arrivée au fond du foyer le précieux combustible soit entièrement brûlé et ne laisse que des cendres épuisées qui se déversent d'elles-mêmes au sous-sol dans les wagons destinés à les emporter.

Plus de chauffeurs, plus de soutiers, plus de manoeuvres, plus personne que quelques surveillants techniciens, hier encore ouvriers manuels !

Chacune des vingt chaudières multitubulaires de cette immense chaufferie, avec ses milliers de tubes alignés en rangs serrés dans la fournaise, expose à la chaleur du foyer une surface de 2000m^2 . La chaleur absorbée par ces tubes se transforme en travail d'ébullition de l'eau qui y circule en émulsion torrentielle et se vaporise à raison de 50 tonnes à l'heure. Chacune de ces chaudières équivaut,

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

comme production de vapeur, à 10 chaudières d'il y a trente ans.

Un fait général nouveau s'impose ainsi à nos yeux : à la concentration des usines de production d'énergie a correspondu une concentration parallèle des unités génératrices de vapeur, pendant qu'à un travail manuel massif se substituait une surveillance intellectuelle presque invisible.



Suivons rapidement le torrent de vapeur depuis sa source au sein des chaudières génératrices.

Torrent de vapeur ? Autrefois n'avons-nous pas, dans le cœur de la montagne, suivi le vrai torrent sortant des neiges éternelles ? Les souvenirs viennent en foule voici le barrage, la prise d'eau, la galerie percée dans le roc aussi loin que possible et avec la pente la plus faible, à la recherche de la plus grande différence de niveau entre les eaux dérivées et leur lit naturel qui disparaît dans les fonds.

Ici, c'est la plus grande différence de niveau thermométrique qui a été recherchée. Non content de produire la vapeur à 250°, le créateur de la « chute thermique » a profité des dernières chaleurs du foyer pour surélever de 250 à 375° la température de la vapeur dans un surchauffeur. Une seule limite à cette ascension en température : la limite de résistance de l'acier très affaiblie à pareil niveau thermométrique.

Du surchauffeur, voici la vapeur qui sort par cette énorme conduite toute frileusement enveloppée d'un épais manteau blanc calorifuge. Quel soin a-t-on apporté à réduire les pertes de chaleur, à réaliser la pente thermique la plus faible possible !

Mais continuons à suivre le torrent de vapeur qui s'écoule invisible à plus de 1000^m à la seconde dans son lit clos d'acier. Nous sommes ainsi conduits dans le hall voisin.

Ici, plus que partout, tout est ordre, clarté, propreté, soumission raffinée des formes dans l'ensemble et le minutieux détail à la plus stricte discipline de l'esprit géométrique. Nous restons saisis devant la grandeur réelle qu'offre le tableau des six groupes turbo-alternateurs de 40.000 kW, alignés comme six unités de combat au milieu de cette salle de 100^m de long sur 25^m de large, dans une immobilité apparente absolue, comme pour une revue d'armée. Seule, une rumeur confuse décèle le travail de Sisyphe qui s'accomplit dans cette enceinte en vue de maintenir devant la division 250.000 kW l'aiguille du wattmètre central qui tend constamment à redescendre à zéro sous l'aspiration d'énergie de la capitale.

Fixons l'un des groupes : deux coquilles d'acier de 5^m de diamètre ; l'une en forme

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

de conque fortement nervurée, c'est la turbine ; l'autre de forme cylindrique plus allongée et régulière, c'est l'alternateur. L'ensemble, très ramassé, fait corps avec une large embase métallique que d'énormes boulons ancrent à un massif de béton. Turbine et alternateur sont réunis par une taille de guêpe, apparemment immobile et qui brille d'un vif éclat d'acier entre les deux masses sombres.

Perçons par la pensée ces carapaces de fonte. La taille de guêpe se prolonge au cœur des deux masses en une ligne d'arbre de 15^m de longueur qui traverse l'ensemble de part en part : nous avons devant nous l'arbre de la turbine et l'arbre de l'alternateur accouplés bout en bout, chef-d'œuvre de métallurgie fine et d'équilibrage mécanique, tournant à la vitesse de 1500 tours à la minute sur de massifs paliers.

Cet arbre et les organes circulaires, parfaitement équilibrés, qui sont calés sur son corps, forment la seule partie en mouvement. Aucun lien matériel entre ce « rotor » et les « stator » de la turbine et de l'alternateur qui l'enserrent sans contact avec un jeu de quelques millimètres : rien que des actions à distance, motrices dans la turbine, résistantes dans l'alternateur.

Scrutons rapidement la turbine. Cette conduite qui sort de terre, c'est l'arrivée de vapeur ; dans l'espace d'une heure, 165 tonnes de vapeur à 25^{kg} de pression et 375° de température, s'engouffrent dans la turbine à la vitesse de 1200^m à la seconde !

Près de l'entrée de vapeur, une sorte de clocheton c'est le régulateur qui contrôle automatiquement l'admission de la vapeur suivant les variations de l'énergie réclamée par le réseau.

Dans le corps de la turbine, l'arbre porte dix grands disques d'acier, sortes d'ombrelles japonaises rigoureusement plates et d'un diamètre croissant de 2 à 8^m. Chaque ombrelle porte sur son contour une couronne de fines persiennes inclinées, en acier nickel-chrome à haute résistance : ce sont les ailettes. Ces dix couronnes d'ailettes mobiles sont séparées par autant de couronnes d'ailettes fixes, suspendues à l'intérieur de l'enveloppe de la turbine et orientées en sens inverse.

Le flux torrentiel de vapeur est astreint à traverser ce labyrinthe. Prenant appui sur chaque ailette fixe, le fluide entraîne chaque ailette mobile en lui cédant une fraction de sa vitesse et de son énergie. D'étage en étage, toute la vitesse et l'énergie de la vapeur sont ainsi passées sur l'arbre de la turbine qui se trouve enlevé à la vitesse de 1500 tours à la minute, et cet arbre entraîne lui-même celui de l'alternateur en dominant la résistance de 40.000 kW que, dans l'alternateur, lui opposent les actions électromagnétiques, génératrices de l'énergie électrique.

Après avoir dépassé le dernier disque, la vapeur, décuplée de volume, a rendu toute son énergie. Par d'énormes conduits, elle s'échappe de la turbine à vitesse, pression et température réduites, comme un gladiateur exsangue quitte l'arène.

Puis, sans répit, la voici aspirée au condenseur : dans cette volumineuse enceinte d'acier, placée en sous-sol au-dessous de la turbine, un agencement conjugué de

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

pompes puissantes et de circulation d'eau froide dérivée de la Seine, entretient un vide et un refroidissement intenses de la vapeur qui finalement s'y condense en eau.



Le schéma général de l'installation nous apparaît maintenant : un bief amont, les chaudières, à température aussi élevée que possible, c'est la source chaude; un bief aval, le condenseur, à température aussi basse que possible, c'est la source froide. Entre ces deux niveaux, et sur un espace de quelques mètres, 165 tonnes de vapeur à l'heure effectuent devant nous une chute thermique vertigineuse de 375 à 25° C.

Entre chute thermique et chute hydraulique, l'analogie est frappante ; elle se prolonge jusqu'à la machine qui des deux côtés recueille l'énergie : la turbine, identique comme principe ici et là.

Après un pareil hard labour, va-t-on enfin laisser cette eau reprendre son cours paresseux entre les rives enchanteresses de la douce rivière de Seine? Non certes, aucun espoir de repos ! Du fait de l'épuration chimique minutieuse que cette eau a subie avant d'être admise dans les chaudières, du fait de son ébullition même au sein de celles-ci, cette eau préparée est devenue un liquide précieux qui n'est plus susceptible d'incruster les tôles de chaudières par les dangereux dépôts des sels de chaux que contiennent les eaux naturelles. Pas une goutte ne doit donc en être perdue. Recueillie précieusement au sortir du condenseur et conduite dans des réservoirs d'alimentation, elle y attendra prisonnière son tour de reprendre le cycle infernal dans les générateurs de vapeur où des pompes à haute pression l'injecteront à nouveau après qu'elle aura été réchauffée.

Ainsi balancée de source chaude en source froide, l'eau, divinement prédestinée à son rôle énergétique par ses propriétés physiques remarquablement appropriées, accomplit sans arrêt dans cette enceinte un cycle qui se rapproche, autant qu'il était possible en l'année 1920, du cycle théorique de Carnot.

Cycle de Carnot : terme idéal de la transformation de la chaleur en travail, dont la réalisation, sans cesse approchée de plus près, mais à jamais inaccessible, correspond à la limite mathématique du rendement de cette transformation que Carnot a énoncée, il y a cent ans, sous cette forme remarquablement simple Différence des températures des sources chaude et froide, rapportée à la température absolue de la source chaude (1).

(1) On sait que les températures absolues se comptent à partir de la température de 273°C. au-dessous de zéro qui est celle au-dessous de laquelle aucun corps ne peut plus exister à l'état gazeux.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Ce talisman va nous donner la clé de toutes les transformations que la machine à vapeur a subies depuis cinquante ans et en particulier des tendances extrémistes actuelles de cette technique.



Du haut du balcon qui domine la salle des machines, prenons maintenant un peu de recul en nous reportant à la fin du siècle dernier.

La salle se transforme, en un rêve, et devient l'immense Galerie des machines de l'Exposition universelle de 1900 dont la lourde masse écrasait, il y a peu d'années encore, la façade de Gabriel à l'Ecole Militaire. Cinquante machines à vapeur agitent furieusement tiges et crosses de pistons, bielles et manivelles massives, volants immenses dont les bras rappellent des ailes de moulins, courroies larges comme des tapis, dynamos monumentales.

Toute cette machinerie en fièvre n'arrive pas à produire, au total, le travail des six groupes turbo-alternateurs immobiles que nous avons réellement à nos pieds ; et demain, un seul groupe à peine plus volumineux, équivaldra à l'ensemble de ces six. N'y aura-t-il pas demain quelque part un groupe de 200.000 kW ?

Nous avons déjà constaté la concentration des sociétés et des usines productrices d'énergie, celle des unités génératrices de vapeur ; c'est maintenant la concentration des machines productrices d'énergie électrique qui s'impose à notre attention de la façon la plus frappante.

Nous nous trouvons donc en face d'un phénomène absolument général de concentration massive de la production d'énergie physique, à tous les échelons de cette production, qui a été en s'accélégrant depuis la fin du siècle dernier. Dans la conception de ces chaudières et de ces machines, la construction de ces usines, la constitution de ces sociétés d'année en année plus puissantes, faut-il ne voir que la satisfaction d'un besoin très américain de faire toujours et de plus en plus du colossal, sans profit tangible pour l'intérêt général ; un sport d'ingénieurs hypnotisés par la recherche de rendements purement théoriques, avec ses matchs dangereux entre sociétés industrielles, nations et continents ? Faut-il n'y voir qu'une course aveugle et un peu enfantine to the biggest in the world sans égard aux inconvénients sociaux souvent attribués aux excès du machinisme ?

Ou bien, cette concentration et ce développement de forces matérielles répondent-ils à une nécessité économique réelle, ou tout au moins ont-ils concouru largement à l'intérêt général ?



BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Sans chercher réponse complète à si vaste problème, demandons aux chiffres quelque lumière qui en précise les données. Dans ces grandes centrales, la comptabilité des calories est tenue avec autant de rigueur que la comptabilité des francs dans une banque, et tout est rapporté à cette unité qui, nous le savons, représente la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré centigrade la température d'un kilogramme d'eau. Adressons-nous donc au bureau compétent : l'usine de Gennevilliers, nous répond-on, consomme en moyenne 6000 calories pour la production d'un kilowatt-heure. Traduit en clair, ce langage abscons signifie que le rendement thermique de l'usine de Gennevilliers est d'environ 15 %.

Comment ! Réaliser une aussi formidable usine pour tirer du bel « or noir » qu'on y dévore un aussi médiocre rendement ! C'est la montagne qui accouche d'une souris ! Hélas oui ! Nous ne savons encore tirer de la transformation de la chaleur en travail qu'un rendement extrêmement faible, et le désappointement devant la médiocrité des résultats d'une pareille mobilisation industrielle serait licite si, en cette matière comme en toute autre, les chiffres avaient une signification autre que relative.

Ces machines de la fin du siècle dernier, que nous venons de voir tourner furieusement dans ce souvenir évoqué de l'Exposition universelle de 1900, avaient un rendement qui ne dépassait pas 9 à 10 %. Elles-mêmes constituaient un stade déjà très évolué de la machine à vapeur.

C'était le chant du cygne de la machine à vapeur alternative, avec ses puissances de 500 à 1000 CV, ses pressions de 8 à 10^{kg}, ses détentes successives de la vapeur à double et triple expansion, dans des cylindres de diamètre croissant, ses mécanismes de distribution perfectionnés, tous dispositifs que nous retrouvons encore dans nos traditionnelles locomotives et à bord de tant de cargos et paquebots anciens, courant encore les océans.

Ces beaux mécanismes réalisaient déjà un progrès de 100 % sur les machines d'il y a un demi-siècle, dont le rendement ne dépassait pas 4 à 5 %.

La liaison ainsi faite avec le passé, si nous situons l'usine de Gennevilliers, vieille de douze ans, par rapport à la minute actuelle, cette grande usine nous apparaît déjà profondément vieillie, tant a été rapide et hardie, depuis la fin de la Grande Guerre, l'évolution de la transformation de la chaleur en travail sur la voie de l'application intégrale des données de la thermodynamique.

Coup sur coup, voici que s'élèvent en bonds de géants les écarts de température et de pression utilisés dans les turbines, tandis que la production d'énergie se concentre en groupes de plus en plus puissants. A l'heure actuelle, des pressions de 45^{kg}, des températures de 400° sont considérées comme normales. Demain, la chaudière à 100^{kg}, actuellement construite en France et ailleurs, ne sera plus exceptionnelle. Des groupes de 100.000, 150.000 kW deviennent courants en Allemagne et en Amérique. Où verrons-nous naître le premier groupe de 200.000 kW ?

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.



Mais n'anticipons pas et contentons-nous, pour le moment, de noter que le stade actuel de la production de l'énergie dans les grandes centrales donne couramment des rendements thermiques de 25 %. Et si nous en croyons des documents dignes de foi ⁽¹⁾, le rendement de 36 % aurait été atteint à la Centrale de la Crawford Avenue à Chicago, avec un groupe de 60.000 kW marchant à la pression de 88^{kg} et à la température de 480°, conditions dans lesquelles le rendement théorique maximum de Carnot serait de 61 %.

(1) Cf. Génie civil du 12 mars 1927

En trente ans, le rendement des machines à vapeur est donc passé en moyenne de 10 à 30 %, c'est-à-dire qu'il faut maintenant trois fois moins de charbon qu'en 1900 pour produire le même travail.

Tandis que chaudières et turbines franchissent à pas de géant pareilles étapes, des progrès importants se réalisent dans l'ensemble des installations.

Plus de chauffeurs, avons-nous vu, plus de soutiers, plus de manoeuvres. Partout, le charbon transporté mécaniquement depuis le wagon ou la péniche qui l'amène jusqu'au foyer de la chaudière. A l'usine de Saint-Ouen, un torrent d'eau balaye les wagons de leur contenu en quelques minutes.

Mais ce charbon si précieux, ne peut-on en extraire la chaleur encore plus complètement qu'en le brûlant sur une grille ? Oui, en le pulvérisant en poudre impalpable et en le comburant comme du pétrole, au moyen de brûleurs où il arrive intimement mélangé à l'air de la combustion. C'est la chauffe au charbon pulvérisé. Ainsi arrive-t-on à tirer bon rendement de poussières médiocres ; les résultats ont été tels que certains charbonnages du Nord ont songé à reprendre les schistes carbonifères abandonnés sur les terrils des mines et à en tenter l'utilisation, après broyage et lavage, comme charbon pulvérisé.

Ce n'est pas tout. Le haut rendement des chaudières dépend du contrôle rigoureux de tous les éléments de la combustion : volume et température de l'air et de l'eau d'alimentation, composition et température des fumées, pression et température de la vapeur, etc. L'idée est venue de réunir tous ces contrôles dans un poste central. En un hémicycle impressionnant sont alignés des marbres qui portent chacun les appareils de mesure d'une chaudière, commandés à distance. D'un coup d'oeil circulaire, on voit la marche de l'ensemble des chaudières. Sur chaque marbre, des volants commandent à distance les vannes d'admission d'eau, d'air, de charbon. Dans cette salle d'une propreté méticuleuse, et complètement isolée de la chaufferie, deux techniciens suivent le mouvement des aiguilles indicatrices et corrigent instantanément chaque écart sur la normale.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Cette installation modèle, encore unique dans son genre, n'est pas outre-Atlantique, mais en France, à la très moderne Centrale d'Issy-les-Moulineaux où ses réalisateurs la montrent avec une juste fierté.



Faisons halte sur ces résultats et tâchons d'en mesurer la portée économique et sociale. Ces beaux progrès techniques ne sont-ils pas compensés par les charges financières considérables qu'entraîne la réalisation de ces immenses usines ? Nous qui nous débattons dans les difficultés croissantes de la vie de plus en plus chère, nous restons sceptiques, et pour cause, devant les résultats pratiques de tout progrès à l'égard de l'homme de la rue dont la bourse est l'objet d'un assaut sans cesse redoublé.

Questionnons les économistes qui, dans cette question brûlante de la vie chère, nous ont accoutumés à en juger par les indices de comparaison entre les prix d'avant et d'après guerre. La réponse est nette : alors que l'indice général d'augmentation du coût de la vie atteint le chiffre 6, l'indice du prix de l'électricité a à peine atteint le coefficient 3.

Cette constatation parle d'elle-même. En retrouverons-nous les effets bienfaisants dans quelque conséquence sociale importante ?

Sur ce point encore, consultons les statistiques. Dans un raccourci saisissant, la Journée industrielle du 30 avril 1930 faisait ressortir que, malgré le ralentissement dû à la période de guerre, la consommation d'électricité a plus que décuplé en vingt-deux ans. Pendant cette période, le nombre des foyers éclairés à l'électricité dans Paris est passé d'un peu plus de 50.000 en 1907, à près de 750.000 en 1928. Il s'accroît à l'heure actuelle d'environ 50.000 par an.

De l'intérieur de luxe dont elle était, il y a trente ans, la parure privilégiée, nous avons vu la lampe électrique gagner progressivement, échelon par échelon, la plus modeste chambre des faubourgs, en se démocratisant et se multipliant à l'infini, amenant avec elle hygiène, propreté, clarté et gaîté. Pendant le même temps, l'énergie électrique, grâce à l'abaissement de son prix de revient, triomphait dans les transports en commun.

Brassant en masses compactes les Parisiens dans le sous-sol de leur cher et vieux « Paname », le Métro, que seule a rendu possible la production de l'énergie électrique à bas prix, les conduira demain, directement, jusque dans la banlieue lointaine où ils trouveront le soir grand air, silence, calme, jardin fleuri et vrai repos.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.



En quittant la Centrale de Gennevilliers, les pensées se pressent à notre esprit. Dans cet élan vertigineux vers les solutions extrêmes qui caractérise actuellement la physique industrielle, où en sommes-nous et où allons-nous ?

Dans le domaine de la vapeur, l'élan est maintenant donné à toutes les audaces vers l'application intégrale des conclusions les plus hardies de la thermodynamique. Il y a cinquante ans des pressions de 7^{kg} étaient audacieuses ; vingt ans après, 15^{kg} étaient une haute pression. Au lendemain de la guerre, 25^{kg}, avec surchauffe à 375°, est considéré comme un maximum. A cette heure, la chaudière à 45^{kg} avec surchauffe à 450° devient courante. Pour parler d'installations très modernes, il faut déjà citer l'installation à 100^{kg} de la Centrale de Mannheim (1), à laquelle répondent les deux groupes à 88^{kg} et à 105^{kg} avec surchauffe à 400 et 480° de Crawford Avenue, à Chicago.

Mais déjà, voici que les usines Siemens-Schuckert, en Allemagne, poursuivent méthodiquement l'essai d'une chaudière « Benson » à 230 atm (2), c'est-à-dire au point critique de l'eau ! La vaporisation est instantanée dès l'introduction de l'eau dans la chaudière. Malgré l'excentricité actuelle d'un pareil essai, rien ne permet de penser qu'il ne sera pas demain de pratique industrielle courante.

Ne voyons-nous pas notre traditionnelle locomotive à vapeur démarrer elle-même de ses normes ancestrales vers les hautes pressions ? Voici la locomotive à 32^{kg} du London and North Eastern Railway (3) ; puis, la locomotive à 60^{kg} de la Société Winterthur, en Suisse (4). Enfin, les visiteurs de l'Exposition de Munich, en 1925, ont pu voir la locomotive de 2000 CV système Schmidt, fonctionnant à la pression de 60^{kg}, dont les essais, poussés pendant trois ans avec la ténacité habituelle de nos voisins de l'Est, ont abouti à une mise au point suffisante pour que les chemins de fer allemands l'adoptent.

(1) Description dans le *Génie civil* du 28 décembre 1929.

(2) Pour les très hautes pressions, à partir de 100^{kg} par centimètre carré, on tend à reprendre l'usage de compter la pression en atmosphères. La différence entre les deux unités est de 3 % environ.

(3) Description dans le *Génie civil* du 18 janvier 1930.

(4) Description dans le *Génie civil* du 17 novembre 1928.

Nous pressentons la difficulté des problèmes de toute sorte que soulève l'emploi industriel de pareilles pressions et températures.

Tout d'abord, difficultés d'enveloppes. A partir de la température de 450°, l'acier subit un fléchissement sérieux de résistance. Les essais qui ont été effectués à l'Ecole centrale en 1928, sous la direction de M. Guillet, ont montré qu'à ces températures l'acier courant, soumis à un effort continu, s'écoule lentement comme une matière colloïdale (1). Il faudra donc avoir recours à des aciers spéciaux dont l'étude commence seulement.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

D'autre part, la vieille construction classique des chaudières en tôles cintrées et rivées perd ses droits à pareilles pressions. Il faut réaliser des corps de bouilleurs forgés d'une pièce dans des lingots d'acier dont le poids peut dépasser 160 tonnes (2).

(1) Cf. Génie civil des 18 mai et 1er juin 1929.

(2) Cf. Génie civil du 26 janvier 1929.

A côté de ces problèmes nouveaux proposés aux métallurgistes et aux constructeurs, d'autres, d'un caractère plus purement scientifique, s'imposent aux physiciens. Nous devons aux travaux immortels de notre compatriote Regnault, vers 1850, les études fondamentales sur les propriétés thermodynamiques de l'eau et de sa vapeur. Longtemps, les formules et les tables de Regnault, établies avec la minutieuse conscience qui ont fait de ce savant un des premiers éducateurs scientifiques de la jeunesse, furent seules à faire foi pour la connaissance des caractéristiques de la vapeur d'eau. Mais ces tables, quoique étendues par les continuateurs de Regnault, ne dépassaient pas encore, il y a dix ans, la pression de 15^{kg}. Tant que les pressions employées dépassèrent de peu celle-ci, les techniciens étendirent les tables au delà de leurs limites par extrapolation. Mais, l'emploi de pressions nettement supérieures exigeait que des recherches fussent entreprises pour compléter la connaissance des propriétés de la vapeur d'eau dans le domaine des très hautes pressions jusqu'au point critique.

Ces recherches ont été entreprises, en Allemagne et aux Etats-Unis, avec un vaste programme et de puissants moyens. Il est regrettable de constater que la France, initiatrice effective de ce genre de recherches comme de tant d'autres grandes œuvres scientifiques, et qui s'honore de posséder dans la cour du Collège de France la tour historique où Regnault travailla, n'a participé que d'une façon à peu près insignifiante à ces nouveaux travaux. Pas un nom français ne se révèle dans la liste des dix-huit savants qui ont pris part à la Conférence internationale des tables de vapeur, réunie à Londres, en juillet 1929, sur initiative britannique.

Même abstention à peu près complète de notre pays à la Conférence mondiale des forces motrices, organisée en 1924 sur l'initiative de la British electrical and allied manufacturers Association. Bâle, Londres, Tokio, Barcelone, Berlin ont vu successivement les réunions de cette conférence qui semble avoir évi té jusqu'ici le sol français.

Notre pays se tiendrait-il à l'écart de ces assises internationales qui prennent figure de sessions annuelles de la Société des Nations scientifiques ? Ou bien, parmi la jeunesse de notre pays, ne se lèveraient plus de mains pour reprendre le flambeau et l'empêcher de passer en mains étrangères ? Dans les rangs serrés de la phalange des ingénieurs français, l'esprit vraiment scientifique, la passion de la recherche persévérante et désintéressée s'effaceraient-ils devant le besoin d'agir vite et superficiellement ?

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.



En poussant l'audace jusqu'à faire travailler la vapeur d'eau à son point critique, n'avons-nous pas atteint la limite des possibilités dans la voie de l'utilisation des chutes thermiques tracée par Carnot ?

Nous allons voir que Georges Claude ne l'a pas cru.

Si le plafond des pressions et des températures paraît bien atteint pour le moment, n'oublions pas que, pour transformer de la chaleur en travail suivant le cycle de Carnot, il suffit que nous disposions d'une différence de température. Rappelons-nous l'analogie avec la houille blanche ; nous savons que de grandes forces hydrauliques sont réalisables aussi bien avec de très basses chutes à très grand débit qu'avec de très hautes chutes à faible débit.

N'en est-il pas de même pour les chutes thermiques ? Jusqu'à ce jour, nous avons cherché la plus grande puissance en réalisant artificiellement la plus grande différence de température. Sommes-nous bien sûrs que la nature n'a pas mis quelque part à notre disposition des basses chutes thermiques à énorme débit qui n'attendent que notre utilisation ?

Et ces masses océaniques immenses dont la température sous les tropiques atteint 25 à 30° en surface, tout en restant immuablement à 4° en profondeur ! Qu'en faisons-nous ? Voici en présence l'une de l'autre, à 1000m seulement de distance verticale, deux masses d'eau inépuisables dont la différence de température, merveilleusement constante, atteint 25° grâce au soleil qui chauffe la surface et aux courants polaires qui refroidissent les fonds. Qu'attendons-nous donc pour mettre en relation ces immenses sources chaude et froide et leur faire rendre toute l'énergie qu'elles contiennent en puissance ? Difficulté de faire remonter l'eau froide des grands fonds ? Un simple tuyau de 2m de diamètre, plongeant à 1000m de profondeur, résoudra la question. Difficulté d'obtenir de la vapeur d'eau en masse à si basse température ?

Ici, cédon la parole au maître dans la note qu'il a présentée, le 15 novembre 1926, à l'Académie des Sciences, en collaboration avec M. Paul Boucherot :

« Nous avons cherché ce que pourrait donner l'emploi, comme fluide moteur, de la vapeur d'eau directement fournie par l'eau tiède de surface. Evidemment, c'était là pure curiosité, l'extrême petitesse des tensions de vapeur de l'eau à 20 ou 25° ne nous donnant aucun espoir. Or, à notre stupéfaction, nous avons constaté combien les conditions ainsi réalisées conviennent excellemment aux turbines à vapeur qui, équipées pour ces conditions mêmes, paraissent avoir été créées pour fonctionner sous des pressions motrices inférieures même au vide des condenseurs usuels. »

Et Georges Claude calcule qu'avec cinq kilogrammes de vapeur à 3/100^e d'atmosphère, fournis par l'eau de surface à 24° et aspirés par le vide à 1/100^e

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

d'atmosphère que peut maintenir au condenseur l'eau froide des grands fonds, il obtiendra le même travail qu'avec un kilogramme de vapeur travaillant à 20 atmosphères dans une chaudière ordinaire.

Puis, devant la savante assemblée dont l'attention est captivée, l'ardent réalisateur fait la démonstration de la petite usine qu'il a installée sur la table académique. Un flacon de verre contenant 20 litres d'eau à 28°, un autre flacon de verre plein de glace qui sera le condenseur ; entre les deux, un tube de caoutchouc sur le parcours duquel a été intercalée une petite turbine Laval. Le vide à 1/100^e d'atmosphère a été fait dans l'ensemble. Le savant ouvre le robinet ; les deux flacons sont mis en communication ; l'eau tiède se met à bouillir tumultueusement et la vapeur se précipite vers le condenseur, actionnant au passage la turbine qui rapidement atteint la vitesse de 5000 tours par minute et entraîne une petite dynamo dont le courant fait briller trois lampes de 2 watts et demi.

Georges Claude, fils intellectuel de Jules Verne, envisage de suite d'immenses usines flottantes de 600.000 CV installées sous les tropiques et tirant parti des richesses inexploitées des régions torrides.

Avant de se lancer en grand, un premier essai semi-industriel s'impose. La Société métallurgique d'Ougrée-Marihaye, près de Liège, prête son puissant concours. Quatre mois d'installation et, le 29 avril 1928, l'usine d'essai est mise en marche ; la source froide est l'eau de la Meuse à 13° ; la source chaude est une dérivation de cette eau réchauffée à 33° par des chaleurs perdues de l'usine. Une turbine construite spécialement est intercalée sur le circuit entièrement clos et vide d'air qui réunit les deux sources. Elle fournit une puissance de 60 kW (1).

(1) Voir le récit de ces essais dans le Génie civil du 23 juin 1928.

De suite, une installation industrielle est décidée à Cuba. Georges Claude, parti là-bas, porte son choix sur la baie de Matanzas à 100^{km} à l'est de la Havane. Un tuyau de 2^m de diamètre, long de 2000^m, atteindra à 1500^m de la côte une profondeur de 600^m.

Dès les premiers jours, le savant lutteur s'est trouvé aux prises avec les gigantesques difficultés que devait rencontrer une pareille œuvre : profils imprévus des fonds marins, courants, écume de l'eau de mer en ébullition, etc. Le 11 juin 1930, notre hardi compatriote télégraphiait qu'il avait réussi à immerger la première partie du tuyau, mais la lutte continue. Souhaitons vivement que, soutenu jusqu'au bout, Georges Claude fasse « knock out » toutes difficultés. Songeons que des mains étrangères, les mêmes peut-être qui achevèrent non loin de là notre canal de Panama, attendent sans doute l'échec du Français, pour venir achever l'œuvre abandonnée et en tirer gloire et profit pour leur pays.

Cette œuvre gigantesque clôt-elle l'ère des audaces thermodynamiques ? Pas encore : non contents d'avoir provisoirement épuisé les possibilités de la vapeur d'eau, des esprits téméraires ont cherché à utiliser d'autres fluides soit pour réaliser des écarts de température plus grands, soit pour travailler au-dessous de 0°.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Dès avant la Grande Guerre, l'Américain W. L. R. Emmet songeait à utiliser comme fluide moteur le mercure, en raison de la température très élevée de sa vapeur (480°) à basse pression (7^{kg}). Une installation fonctionne à Hartfordt (U. S. A.) et aurait confirmé le haut rendement théoriquement escompté (1).

Plus près de nous, M. H. Barjot expose, le 3 décembre 1928, à l'Académie des Sciences une conception extraordinaire par laquelle il suggère d'utiliser l'énergie thermique des régions polaires, si l'on peut ainsi s'exprimer, en employant un fluide (éther de pétrole en solution saline) qui ne se congèle qu'à basse température.

(1) Cette installation est décrite dans le Génie civil du 5 janvier 1924.

Enfin, le Congrès de l'Association technique maritime et aéronautique de 1928 entend une communication de M. Maurice Roy sur la turbine à combustion interne ; dans laquelle le combustible liquide ou pulvérisé, brûlant directement dans la turbine, créerait la source de chaleur au sein même de l'organe moteur. Dans cette conception, qui est encore du domaine de la philosophie scientifique, la turbine moderne donnerait la main à la vieille machine à piston qui, de son côté, s'est depuis longtemps débarrassée de la vapeur d'eau dans le moteur à combustion interne, communément appelé moteur Diesel, le moteur marin d'aujourd'hui et de demain.



Tout en ne suivant pas Cyrano de Bergerac dans la Lune, croyons cependant que tout ce qui est théoriquement possible l'est pratiquement aux hommes de science et d'action à qui la Grande Guerre a appris à ne reconnaître aucun obstacle.

A côté de la galerie des extrémistes que nous venons de parcourir, il y a la foule des ingénieurs et des techniciens qui, dans l'ombre, travaillent au perfectionnement des solutions moyennes et raisonnables et dont la somme des efforts ignorés crée jour par jour ces merveilles de précision qui sont les machines motrices modernes. Le 13 janvier 1930, mourait l'un d'entre eux, Auguste Rateau, dont le monde scientifique et industriel a unanimement salué la mémoire comme le type du travailleur dont toute la vie s'est passée à mettre sa haute culture scientifique au service d'innombrables réalisations.

Servie par de tels hommes, la vieille machine à vapeur de Denis Papin et de Watt, que les progrès de la houille blanche et des moteurs à combustion interne menaçaient si sérieusement au lendemain de la Grande Guerre, a fait entièrement peau neuve et repris au Soleil une place de premier rang.

Les dernières statistiques officielles montrent qu'un équilibre harmonieux s'est établi entre ces sources d'énergie en pacifique compétition.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

En l'an 1927, la houille blanche a produit en France 5 milliards de kilowatts-heures, pendant que les usines thermiques en produisaient plus de six.

Cette fois, c'est la houille blanche qui réagit avec une augmentation de 15 % en 1926, alors que l'énergie thermique a perdu 3 %.

L'avenir est donc à la collaboration équilibrée entre toutes les sources d'énergie. Tandis que le moteur à explosion tient sans conteste l'empire de la route et des airs, tandis que le moteur à combustion interne gagne peu à peu l'empire des mers, les grandes centrales de houille noire, se concentrant progressivement sur les gisements mêmes de charbon, unissent leur énergie à celle de la houille blanche par l'intermédiaire des lignes de transport de force, dont le réseau d'Ariane couvrira demain la France entière.

BIED-CHARRETON.
DE LA TURBINE A L'ATOME.

LA THÉORIE CINÉTIQUE

LES DESSOUS DU CODE DE LA NATURE

En machine à 120 à l'heure, cramponnés à la rampe du tender côté droit.

La face arrière de la chaudière nous domine de sa haute muraille où brillent cadrans de manomètres, volants de vannes, tubes de niveau d'eau et, au centre, le grand levier du régulateur.

A gauche, le mécanicien tout entier aux signaux qui courent au-devant de lui. Nous avons un jour suivi cet homme en pleine action.

D'autres préoccupations retiennent aujourd'hui notre attention sur le grand corps d'acier qui fuit devant nous. Notre regard, guidé par celui du chauffeur, s'hypnotise sur l'aiguille du manomètre qui tremblote nerveusement autour de la division 20 hectopièzes. Puis, il glisse le long du petit tube de cuivre qui relie le manomètre à la chaudière et, avec celui-ci, voudrait percer l'enveloppe d'acier et pénétrer au sein de la chaudière.

Dans ce grand corps sombre, que se passe-t-il ? Mais, nous le savons bien ! N'avons-nous pas déjà scruté la vie des chaudières modernes et assisté aux scènes principales de la transformation de la chaleur en travail, ce grand spectacle de la vie industrielle dont le premier acte se joue ici devant nous ?

Et cependant notre esprit reste inquiet.

Nous avons l'impression que toutes les clartés que les Pascal, les Watt, les Carnot, les Clausius ont jetées sur ces grands problèmes physiques, quelque vives qu'elles soient, ne sont que superficielles. On dirait une sphère vivement éclairée dont le centre resterait sombre ; un de ces lointains paysages comme Hubert-Robert les voyait et dont les détails, se fondant en teintes générales harmonieuses, restent eux-mêmes invisibles ; ou encore une armée que nous observerions d'un point de vue très élevé et dont nous n'apercevriions que les grandes masses et les évolutions d'ensemble, sans distinguer les soldats ni leurs mouvements individuels et encore moins leur anatomie et leur physiologie individuelles.

La haute et harmonieuse tenue philosophique des énoncés d'un Pascal et d'un Carnot n'est-elle pas elle-même un avertissement du reflet que l'esprit humain a laissé de son élévation surnaturelle sur les phénomènes universaux dont ils ont fixé les lois ?

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Voici la grande houle de l'Océan : de connaître les lois générales qui régissent sa propagation, son amplitude, la période, la longueur et la vitesse de ses ondes, nous fait-il par soi-même pénétrer au sein de la masse liquide et voir clair dans les mouvements intimes de cette masse dont la houle de surface n'est que l'enveloppe ?

Ainsi se précise notre impression que les grandes lois de la statique des fluides et de la thermodynamique auxquelles nous ont initiés les Pascal, les Mariotte, les Carnot ne sont que des enveloppes générales (les mathématiciens diraient des intégrales), de phénomènes intimes qui nous restent profondément inconnus.

L'évolution de ces pensées accentue la curiosité qui rive notre regard sur cette chaudière et nous rend indifférents à la griserie de la vitesse du grand train lancé à 35^m à la seconde.

Quelle est donc la nature intime des phénomènes qui se passent derrière ce mur d'acier et dont l'effet global est la pression que Pascal nous a appris à chiffrer ? Avant le grand penseur, nos pères avaient réponse à pareille question : si l'air soufflé dans une outre l'envahit et la gonfle, c'est que la nature a horreur du vide. C'était une explication comme tant d'autres, dont nous nous contentons encore aujourd'hui sans nous en douter.

Pascal a bousculé cette explication plusieurs fois centenaire en en montrant l'inanité. Qu'a-t-il mis à sa place ? Rien. Quel que fût son génie, l'héritage scientifique de son temps ne mettait pas à sa disposition les matériaux nécessaires à combler la lacune.

Un siècle doit s'écouler après lui pour qu'avec Daniel Bernoulli, de la célèbre lignée des mathématiciens de Bâle, et Euler, l'autre grand géomètre de Bâle, commence à poindre l'aube de nouvelles théories que le xviii^e siècle ne comprend pas et laisse tomber. Un deuxième siècle doit passer avant que de grands chercheurs parmi lesquels, en Angleterre, l'illustre physicien Maxwell et sir W. Ramsay ; en Allemagne, les physiciens Clausius, Boltzmann ; en France, les PP. Delsaux et Carbonnelle, M. Jean Perrin, reprennent l'idée et esquissent trait par trait, au cours du xix^e siècle, les grandes lignes d'un rêve qui s'est précisé par étapes successives.

Voici la fin du xix^e siècle. Brusquement, comme par des lampes de mille bougies qu'on allumerait coup sur coup dans une grande salle dont l'obscurité était jusqu'alors à peine dégoûrdie par quelques veilleuses, le rêve s'est éclairé par quanta précipités de clarté croissante, puis élargi et précisé sous la forme d'un tableau de la constitution intime de la matière si étrange, si inattendu, si contraire aux directives classiques de la pensée scientifique que les savants qui en ont été les premiers témoins en sont restés saisis et ont exprimé leur émotion en des lignes dont le pathétique contenu a été rarement atteint.

BIED-CHARRETON.
DE LA TURBINE A L'ATOME.



Au terme de notre voyage, en un village de la profonde France.

Les volets clos arrêtent l'ardeur d'un soleil de juillet. Tout semble dormir dans l'immobilité absolue.

Une fente de volet laisse passer un mince rayon de soleil qui trace dans la demi-obscurité de la pièce un faisceau de projecteur. Notre œil fixe la plage lumineuse. Par millions nous apparaissent vivement éclairées des fines particules, grains de poussière, filaments de laine, légion de débris, que l'usure de la vie a arrachées aux rideaux, tapis, meubles, objets de toute sorte de cette pièce et aux vêtements de ses occupants.

Le quadrille plein d'entrain que danse cette multitude fait surgir de notre mémoire le chant célèbre de Lucrèce dont sur ce rayon notre main atteint une vieille édition :

« Cum solis lumina cumque inserti fundunt radii per opaca domorum (1) ... »

(1) LUCRÈCE, De rerum natura. Chant II, vers 114 et suivants.

Remontant vingt siècles dans le passé, nous nous retrouvons à côté du poète latin, observant le phénomène familier, immuable à travers les âges.

« Tu verras une multitude de menus corps se mêler de mille manières parmi le vide dans le faisceau même des rayons lumineux, et comme engagés dans une lutte éternelle, se livrer combats, batailles sans prendre trêve, agités par des rencontres et divorces sans fins. »

Puis, en un reflet de la pensée géniale de Démocrite dont Lucrèce ne fut que le miroir, et qui devait sommeiller deux mille ans avant de reprendre vie sous forme de théorie scientifique moderne, le poète latin conclut :

« Tu pourras te figurer par là ce qu'est l'agitation éternelle des corps premiers dans le vide immense, pour autant qu'un petit fait peut nous fournir un modèle des plus grands. »

Simple tourbillon d'air et de poussière, dus aux différences locales de température, nous disons-nous avec raison. Et de fait, en regardant attentivement, nous voyons bien les particules voisines se mouvoir dans le même sens, en dessinant grossièrement la forme des courants d'air qui les entraînent.



BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Sur la table, un verre d'eau.

Faisons glisser délicatement un peu de vin rouge sur le bord du verre. Le précieux breuvage plonge dans l'eau cristalline en gracieuses volutes qui remontent sans tarder pour se rassembler à la surface de l'eau plus lourde en une couche rubis. Quelques secondes et voici la séparation devenue parfaitement nette.

Abandonnons maintenant le verre dans le silence, la demi-obscurité et le repos absolu de cette salle éloignée de toute trépidation. Rien apparemment ne doit plus venir troubler l'équilibre statique des deux liquides superposés, le plus lourd supportant le plus léger.

Une heure s'écoule. Que se passe-t-il ? La zone rouge a gagné vers le bas. Elle continue à descendre lentement mais sûrement ; on dirait l'invasion d'une armée rouge irrésistible. Puis tout est fini : plus qu'une masse uniformément rose d'abondance fraîche et tentante.

Voici le trouble dans notre esprit. Comment concilier cet innocent petit fait avec nos vieilles certitudes classiques sur l'équilibre statique des liquides ?

Le vin plus léger a-t-il pu de lui-même plonger dans l'eau plus lourde placée au-dessous de lui, dominant la pesanteur par une force cachée supérieure ?

Une explication possible : les particules de vin et d'eau, apparemment immobiles, seraient en perpétuels petits mouvements imperceptibles qui les feraient se mêler à leur frontière. L'énergie de ces mouvements l'emporterait sur la pesanteur au point d'aboutir au mélange complet et intime des deux liquides.

Mouvements spontanés et perpétuels au sein de liquides apparemment inertes ? Impossible de croire sans avoir vu ou au moins entrevu.

Essayons donc de regarder avec un microscope à très fort grossissement un peu d'eau impure et trouble de la mare voisine. Un émerveillement nous attend, le même qui, en 1827, saisit le botaniste anglais Brown, lorsque, le premier, il eut l'idée de faire cette observation.

A l'oculaire, une légion innombrable de très fines particules en suspension dans l'eau, livrées à une sarabande diabolique : le va-et-vient d'une foule en délire. Tâchons de fixer l'une d'elles : elle tourne, monte, descend, remonte en proie à des déplacements brusques d'une vivacité extrême.

Assurons-nous que la table est d'aplomb, qu'un camion ne passe pas sur la route, un train dans le lointain, que notre goutte d'eau est à l'abri de toute variation de température. D'ailleurs, qu'importe ? Rien de commun avec une agitation d'ensemble ; voyez cette particule, elle court follement, faisant mille détours brusques, toute seule de son côté, d'un mouvement complètement indépendant de ses voisins et parfaitement désordonné.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Nous avons certainement affaire ici à un phénomène exceptionnel dû à une cause accidentelle qui nous échappe et qui va cesser. Laissons tout en place et allons faire un tour d'une heure dans la campagne. Au retour, vite l'œil à l'oculaire ; toujours le même mouvement. Nous reviendrons demain, dans un an, dans dix ans toujours le même mouvement.

Au fond du caveau le plus reculé de la pyramide de Khéops, une goutte de parfum trouble est restée dans le sein d'un vase hermétique, dans l'immobilité, l'obscurité, le silence de soixante siècles. Observons-la au microscope : toujours le même mouvement tel que le vieux Pharaon aurait pu l'observer, tel qu'il doit exister jusqu'au fond des abîmes du Pacifique depuis la condensation première des eaux !

Dans la mesure où pareils termes peuvent s'appliquer au monde matériel, nous pouvons répéter avec M. Jean Perrin (1) : le mouvement brownien est éternel et spontané !

(1) J. PERRIN, Les Atomes, p. 123. Librairie Alcan.

Dans une série d'expériences d'une rare élégance, sur la portée desquelles nous aurons à revenir et qu'il a décrites dans son beau livre les Atomes, M. Jean Perrin a réussi à pointer au microscope de cinq en cinq secondes, avec son élève M. René Costantin, un de ces jeunes savants que la Grande Guerre a fauchés, les positions successives d'un globule d'une émulsion en suspension dans un liquide. D'une façon plus frappante encore, MM. Victor Henri, Comandon et de Broglie ont réussi à tourner le film du mouvement brownien d'une émulsion, en la photographiant de vingtième en vingtième de seconde.

La courbe décrite par un grain, à la vitesse moyenne de 500^m à la seconde, défie toute imagination comme incohérence. Il s'agit bien d'une courbe continue puisqu'on peut suivre le grain sans perdre son identité ; et cependant il est impossible, affirme M. J. Perrin, que cette courbe comporte une tangente en certains de ses points, tellement elle varie follement en direction. Même variation folle de vitesse. Nous trouverions-nous réellement en présence de courbes continues sans tangentes, étrange application naturelle de ces fonctions continues sans dérivées que les mathématiciens ont récemment imaginées et introduites dans leurs spéculations ?



Si de pareils mouvements sont observables dans les liquides, n'avons-nous pas des raisons sérieuses de les retrouver au sein des gaz ?

Rappelons-nous l'expérience célèbre de Berthollet au début du siècle dernier. Dans les caves de l'Observatoire de Paris, le grand chimiste savoyard mit en

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

communication deux ballons de verre superposés ; celui du haut contenait de l'hydrogène ; celui du bas du gaz carbonique vingt-deux fois plus lourd. Après plusieurs heures de séjour dans ces caves célèbres par la constance absolue de leur température, on retrouva dans les deux ballons les deux gaz mélangés dans des proportions rigoureusement égales : réplique exacte pour les gaz de notre petite expérience du verre d'eau et de vin.

En conclure simplement que les gaz sont expansibles, comme l'ont fait pendant un siècle les traités de Physique classiques, c'est mettre sur le phénomène une étiquette provisoire en attendant de l'analyser.

Comme pour notre verre d'eau et de vin, une seule explication nous vient à l'esprit si les deux gaz, si différents comme densité, sont arrivés à se pénétrer intimement bien que le plus léger fût au-dessus, c'est que leurs particules (nous pouvons les nommer molécules) sont animées de mouvements spontanés et perpétuels qui les ont fait cheminer en tous sens, sans se soucier de la pesanteur, en un mot, de ces mouvements browniens déjà identifiés dans les liquides.

S'il en est ainsi, ne pourrions-nous pas entrevoir les mouvements browniens dans les gaz comme dans les liquides ? Le moyen aussi simple qu'élégant en a été trouvé récemment par M. de Broglie.

Allumons une cigarette et insufflons délicatement une légère bouffée de fumée dans une minuscule capsule de verre que nous refermons aussitôt.

Concentrons sur cette capsule la lumière d'une forte lampe et regardons au moyen de l'ultra-microscope, à angle droit du faisceau lumineux. L'équilibre de température est établi ; rien ne doit plus bouger dans la cellule.

Emerveillement ! Dans le champ de l'appareil, mille étoiles brillantes, les globules de fumée, dansent une sarabande follement désordonnée dans laquelle nous reconnaissons nettement le mouvement brownien, mais beaucoup plus vif que dans les liquides. On dirait des balles ultra-légères que se renverraient de plein fouet et en tout sens, des raquettes invisibles cachées au sein du fluide. Que sont ces mystérieuses raquettes ? L'idée nous vient tout de suite que ce sont les molécules de l'air dont l'expérience de Berthollet nous a fait pressentir le mouvement perpétuel.

Nous serait-il donc donné d'apercevoir indirectement, comme dans un miroir, et la réalité physique des molécules et leur état permanent de mouvement ?

Comme en un délire, nous entrevoyons des milliards de projectiles infiniment petits qui se croisent en tous sens, se choquent et choquent les particules en suspension dans le milieu, projetant dans le même désordre, comme des billes de billard, celles de ces particules dont la masse n'est pas suffisante pour résister au choc.

« Tu pourras te figurer par là ce qu'est l'agitation éternelle des corps premiers dans le vide immense... »

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Les vers de Lucrèce nous apparaissent distincts sur le fond du tableau. La vision géniale de Démocrite traduite par le poète latin a attendu 2500 ans pour se révéler comme réalité dans le champ du microscope.



Les constatations étranges que nous venons de faire au sein de la matière fluide, nous entraînent vers des horizons profonds qu'illuminent des lueurs toute nouvelles.

Ainsi donc les investigations de la physique moderne paraissent confirmer la conception du philosophe antique que Daniel Bernoulli devait, au xviii^e siècle, préciser sous la forme suivante dans son « Hydrodynamica » publiée à Strasbourg en 1738 :

« Les molécules des gaz se meuvent perpétuellement d'une façon complètement indépendante les unes des autres, se choquent réciproquement et choquent tous les obstacles qu'elles rencontrent en rebondissant comme des balles élastiques. »

Tel est le principe de la théorie cinétique des gaz qui était appelée à un si beau développement au cours du xix^e siècle en s'étendant à tous les états de la matière sous l'appellation générale de théorie cinétique.

De l'énoncé de ce principe déferle une vague de déductions.

Voici un cylindre plein d'air. Chaque molécule d'oxygène ou d'azote qui vient choquer la paroi du ballon, la pousse. L'ensemble de ces poussées pour les milliards de milliards de molécules qui remplissent le ballon doit former pression sur la paroi. Nous avons prononcé le mot de pression : la pression d'un gaz ou d'une vapeur ne serait donc que la résultante des chocs de ses molécules contre les parois ?

Tiendrions-nous le secret intime de notre chaudière ?

Mais suivons les conclusions qui se pressent, formant autant de vérifications éclatantes de la théorie cinétique.

Sur deux éléments de paroi d'égale surface, le nombre de chocs doit être sensiblement le même, donc aussi la pression. Sur une surface dix fois plus grande, il y aura dix fois plus de chocs; la pression totale sera donc aussi dix fois plus grande.

C'est le principe de Pascal.

Réduisons de moitié notre cylindre; les molécules d'air vont évoluer dans un

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

espace moitié moindre; chaque élément de surface recevra deux fois plus de chocs; la pression doublera donc. C'est la loi de Mariotte.

Continuons à comprimer à bloc. Les molécules vont se rapprocher tellement que leur volume, comme dans une foule trop dense, troublera leur circulation. En outre, ces petits individus, qui obéissent comme tous les corps à l'attraction universelle, vont s'attirer d'autant plus vivement qu'ils seront plus rapprochés. Dans le domaine des très hautes pressions, l'énergie des chocs moléculaires sur les parois, ce que nous appelons la pression, va donc croître moins vite que ne le commanderait la loi de Mariotte.

C'est bien ce qu'avait prévu, en 1873, le physicien hollandais Van der Waals qui a apporté à cette loi les corrections nécessaires.

Ce n'est pas tout.

Chauffons notre masse d'air. La force vive des molécules et la violence de leurs chocs vont augmenter, donc aussi la pression. C'est la loi de Gay-Lussac.

Refroidissons maintenant en continuant de comprimer. La force vive des molécules décroît, tandis qu'augmente leur attraction mutuelle. Brusquement, cette dernière devient prépondérante; les molécules s'accrochent les unes aux autres dans un état nouveau, l'état liquide. Dans cet état, les molécules sont liées entre elles, comme nous sommes liés à notre planète par la pesanteur. Nous pouvons courir les routes et les mers, entrer en collision, faire le tour du monde, nous élever en avion; nous nous agitons même terriblement. Mais l'heure semble lointaine encore, à laquelle nous pourrions nous projeter en l'air avec une vitesse suffisante pour vaincre l'attraction terrestre et faire un voyage dans la lune. Un liquide a aussi une limite que la plupart de ses molécules ne peuvent franchir, c'est sa surface libre.

Toutefois, certaines molécules abordent la surface avec une vitesse et une orientation favorables et parviennent à s'échapper: le liquide se vaporise donc, et d'autant plus activement que la force vive de ses molécules est plus grande, c'est-à-dire sa température plus élevée.

Continuons à refroidir. Voici les molécules qui perdent encore de leur force vive; finalement, l'attraction mutuelle prend le dessus; les molécules entrent en contact plus ou moins brusquement; le liquide passe à l'état solide. A cet état, les molécules sont liées entre elles, comme le prisonnier au gendarme, par un solide cabriolet qui l'empêche de faire un pas. Toutefois, le cabriolet n'empêche pas le prisonnier de s'agiter sur place; la molécule continue aussi de s'agiter dans le corps solide, mais sans quitter sa place.

Terminons enfin en descendant dans les profondeurs du froid. Plongeons notre masse d'air dans l'hydrogène liquide, dans du plus froid encore si possible, de façon à toucher presque la température de moins 273°C ., ce zéro absolu des physiciens qui n'est que l'inverse du coefficient de dilatation des gaz ($1/273$). Notre air est liquide depuis longtemps; il se solidifie. L'activité moléculaire va en mourant, le nombre des chocs décroît, les molécules anémiées tombent

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

inanimées les unes sur les autres pour ne plus se relever. Plus d'état gazeux, ni liquide. Plus de pression. C'est le néant de l'activité thermique, le véritable zéro thermique absolu.

La chaleur ne serait-elle ainsi que la force vive des molécules en mouvement ?

Dès lors le grand phénomène de la transformation de la chaleur en travail s'éclaire sous nos yeux. Pouvons-nous même parler de transformation ? Nous ne voyons plus que le changement de forme sensible d'une énergie toujours la même, l'énergie cinétique.

Les cloisons tombent coup sur coup dans notre esprit entre tant de grands principes et de grandes lois de la physique, entre les trois grands états de la matière que nous étions accoutumés à considérer comme des entités distinctes. A la place de tant de cellules isolées, apparaît une salle immense éclairée par une lampe unique et puissante : l'activité moléculaire.



Mais les confins de la salle trop vaste se perdent encore dans une ombre indécise. Malgré tant de clarté, un doute sérieux subsiste encore dans notre esprit sur la réalité de ce tableau trop grand dans son unité.

Ce qui nous a frappés par-dessus tout dans le mouvement brownien, c'est son désordre absolu. Impossible de discerner d'autres lois à ces mouvements que leur incohérence parfaite, s'il est permis de parler de perfection en parlant du chaos.

Si ces mouvements browniens aperçus à l'ultramicroscope sont bien le reflet du mouvement réel des molécules, comment pouvons-nous imaginer que l'ensemble de mouvements et de chocs aussi désordonnés puisse donner, comme résultante, ces grands principes et ces grandes lois de la nature dont l'ordonnance parfaite et la conformité exacte à la logique de notre intelligence font notre admiration ?

Du désordre intime absolu de la matière, peut-il donc résulter, par simple somme intégrale, l'ordre et l'harmonie universels ?



Voici une pièce de deux sous. Livrons-nous au jeu innocent de pile ou face en nous efforçant d'éviter tout mouvement systématique susceptible de fausser le hasard. La pièce de monnaie n'a de son côté, suivant l'expression du mathématicien Joseph Bertrand, ni conscience ni mémoire. Nous sommes donc

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

dans les conditions humainement les plus parfaites du hasard idéal. Nous avons le temps ; continuons en notant avec soin nos résultats.

Un grand penseur n'a pas cru indigne d'en faire autant et d'appliquer à ce petit jeu toute son acuité d'esprit. Pascal reconnut vite qu'en jouant assez longtemps, les combinaisons de pile et de face, auxquelles donnait lieu la partie, revenaient avec une probabilité frappante. Le hasard absolu avait donc ses lois auxquelles l'analyse mathématique, qui n'est autre qu'une sténographie du raisonnement, devait s'appliquer avec fruit. Pascal s'attaqua au problème et publia le résultat de ses recherches, en 1654, dans son Traité du Triangle arithmétique.

Par son fameux triangle, base de la théorie mathématique des combinaisons, Pascal donne le moyen simple de connaître la probabilité d'amener par exemple soixante fois pile sur cent parties de pile ou face. Le calcul des probabilités était né. L'avenir lui réservait une destinée scientifique dont l'intérêt dépasse, hors de toute proportion, celui des amateurs de baccara et de roulette, et même des compagnies d'assurance dont il a fait l'immense fortune.

Nous parlons de hasard ! Ce mot a le don d'intriguer. Tout d'abord, ne cherchons pas sous cette appellation quelque cause mystérieuse déterminant, comme sous l'impulsion d'une volonté fantaisiste, des effets contradictoires et incohérents. En matière scientifique, le hasard n'est que la résultante d'un très grand nombre de phénomènes indiscernables, échappant à notre analyse. Le hasard agit dans la nature à la manière de l'esprit de finesse qui élabore inconsciemment dans notre esprit la conclusion d'un grand nombre de prémisses subconscientes.

C'est bien dans ce sens que nous attribuons au hasard, et l'incertitude de certains jeux, et les vicissitudes de la vie des foules humaines, et l'incohérence des mouvements moléculaires au sein de la matière.

Dès lors, ne pouvons-nous appliquer le calcul des probabilités à l'étude des lois de la Physique de la même façon que le grand statisticien belge, Quetelet, a eu le premier l'idée de l'appliquer aux études démographiques ? C'est bien ce qu'ont pensé de grands savants, et en particulier l'illustre Maxwell, au génie duquel revient l'introduction systématique des calculs statistiques dans l'étude des gaz.



Reprenons l'expérience de Berthollet. Les deux gaz, hydrogène et gaz carbonique, primitivement superposés dans deux ballons, le plus léger en haut, se pénètrent réciproquement grâce aux mouvements désordonnés de leurs particules, et finalement parviennent à se mélanger d'une façon à peu près homogène. Nous disons à peu près ; car il ne saurait dans notre esprit résulter aucune exactitude ni régularité d'une action abandonnée au hasard.

C'est le moment de faire intervenir le calcul des probabilités. Recherchons donc

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

par le calcul quelle est la probabilité pour que l'un des ballons contienne par exemple, pendant un instant très court, un cent-millième d'hydrogène de plus que l'autre. Cette différence infime, nous semble-t-il, est tout à fait dans l'ordre des choses probables, étant donné le hasard absolu qui préside au passage constant des molécules d'un ballon à l'autre.

Des mathématiciens ont fait ce calcul. Contenons notre étonnement ! Le résultat s'exprime par un nombre décimal comportant un zéro, puis une virgule, puis un million de millions de zéros et enfin le chiffre 1 ! La sténographie mathématique permet d'écrire ce nombre invraisemblable de la manière très courte suivante $10^{-2\ 000\ 000}$. M. Emile Borel a donné dans son livre le Hasard (1) l'image suivante de ce résultat :

(1) Émile BOREL, Le Hasard, Librairie Félix Alcan, Paris.

Concevons qu'on ait dressé un million de singes à frapper au hasard sur les touches d'une machines à écrire et que, sous la surveillance de contremaîtres illettrés, ces singes dactylographes travaillent avec ardeur dix heures par jour avec un million de machines à écrire de types variés. Les contremaîtres illettrés rassembleraient les feuilles noircies et les relieraient en volumes. Et au bout d'un an, ces volumes se trouveraient renfermer la copie exacte des livres de toute nature et de toutes langues conservés dans les plus riches bibliothèques du monde. Telle est la probabilité pour qu'il se produise pendant un instant très court, dans le récipient A (un de nos ballons), un écart de l'ordre du cent millième dans la composition du mélange gazeux. Supposer que cet écart ainsi produit subsistera pendant quelques secondes revient à admettre que, pendant plusieurs années, notre armée de singes dactylographes, travaillant toujours dans les mêmes conditions, fournira chaque jour la copie exacte de tous les imprimés, livres et journaux, qui paraîtront le jour correspondant de la semaine suivante sur toute la surface du globe et de toutes les paroles qui seront prononcées par tous les hommes en ce même jour. Il est plus simple de dire que ces écarts improbables sont purement impossibles.

Nous pouvons donc l'affirmer à $10^{-2\ 000\ 000}$ près : « le miracle des singes dactylographes », s'il se produisait, serait un véritable miracle.

Miracle également, avec la même approximation, l'éventualité d'une hétérogénéité d'un cent-millième dans un des deux ballons de Berthollet.

Toujours dans la même mesure, miracle serait une inégalité de pression dans un récipient plein de gaz, c'est-à-dire un accroc au principe de Pascal.

Miracle aussi un renversement des lois de Van der Waals et de Gay-Lussac.

Miracle encore un cas de carence indiscutable du principe de Carnot.

Et cependant ces grands principes et lois de la Physique ne nous apparaissent plus que comme des principes et des lois statistiques, ainsi qu'on nomme maintenant les lois qui ne sont que l'intégrale perceptible à nos sens de phénomènes élémentaires infiniment nombreux et soumis au hasard. La théorie

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

cinétique les a détrônés de leur caractère absolu pour ne leur laisser qu'un caractère de probabilité, infiniment grande, il est vrai, mais qui n'est plus toutefois la certitude philosophique absolue.

Quoi ! Le principe de Carnot, fondement de la science thermodynamique, qui a elle-même rénové la plupart des sciences physiques, chimiques et même biologiques modernes, faut-il nous résigner à n'y voir qu'un simple principe statistique, du même ordre, au degré de probabilité près, que ces lois démographiques, actuellement groupées sous le nom de biométrie et qui résultent de l'interprétation des statistiques sociales ?

Pour achever de nous convaincre, voyons comment Maxwell a mis en évidence ce caractère du principe de Carnot par une de ces images frappantes auxquelles a excellé son génie.

Voici deux réservoirs remplis d'air à la même température (1) ; ils sont en communication, mais par un trou tellement petit qu'il n'y peut passer à la fois qu'une seule molécule dans un sens ou dans l'autre. Un démon subtil est posté à cet orifice et manie un volet minuscule au moyen duquel il ouvre ou ferme à volonté l'orifice sans se donner aucune peine. Systématiquement, le petit diable, tel un agent armé de son bâton blanc, laisse passer de droite à gauche les molécules lentes et arrête les molécules rapides. Peu à peu, les molécules lentes vont s'accumuler dans le réservoir de gauche, tandis que les molécules rapides resteront enfermées dans celui de droite. Nous avons vu que la chaleur n'est que la force vive des molécules. Avec une dépense infiniment petite de travail, notre diabolin va donc faire monter la température dans le réservoir de droite et baisser dans celui de gauche. De rien il créera donc une différence de température, c'est-à-dire une source d'énergie, et fera ainsi échec et mat le principe de Carnot !

(1) Cf. COURTINES, Où en est la Physique ?, p. 102, Gauthier-Villars.

Infiniment peu probable est-il, nous le savons bien, qu'une majorité de molécules lentes passent d'elles-mêmes de droite à gauche. Mais il suffit que le cas puisse théoriquement se produire, quoique avec une probabilité infime, pour enlever, philosophiquement parlant, au principe de Carnot, ainsi que, par voie de conséquence, à la thermodynamique et à toutes ses ramifications, son caractère impératif absolu et en faire simplement un principe statistique, une simple application des lois du hasard au mouvement parfaitement désordonné des molécules au sein de la matière.



Faisons halte au soir de cette randonnée à travers le domaine si vaste et si nouveau de la théorie cinétique.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Les révélations que cette théorie nous apporte sur les dessous du vieux code de la nature révolutionnent tellement nos traditionnelles conceptions scientifiques qu'elles exigent des vérifications formelles pour emporter notre conviction.

Vérifications indirectes tout d'abord : Maxwell en a apporté une éclatante, en 1866, en expliquant par le bombardement moléculaire le fait que la viscosité des gaz n'augmente pas avec la pression, phénomène qui avait toujours fort surpris les physiciens.

Mais des vérifications directes s'imposent. Si la loi des grands nombres masque à nos sens les irrégularités du mouvement brownien dans les conditions normales d'observation, nous devons pouvoir, en expérimentant sur des proportions microscopiques d'une matière en équilibre, déceler un régime permanent de variations, de fluctuations dans les propriétés de ces matières (1).

(1) Cf. J. PERRIN, Les Atomes, Chap V : Les Fluctuations.

Deux grands physiciens modernes, Einstein, le célèbre protagoniste de la Relativité, et surtout le physicien polonais Schmoluchowski, se sont attachés à chiffrer et à mettre en évidence de pareilles fluctuations.

Sans qu'il nous soit possible d'entrer dans le détail des investigations mathématiques et des expérimentations très délicates auxquelles ces physiciens ont soumis ces difficiles problèmes, notons qu'ils ont réussi à déceler des fluctuations de densité dans les fluides au voisinage du point critique et à expliquer de cette façon l'opalescence énigmatique qui caractérise toujours l'approche de ce point.

Par des fluctuations du même ordre a été expliquée la coloration bleue du ciel qui a fait l'objet de très belles études de Lord Rayleigh.

M. Jean Perrin a pressenti de son côté que « l'équilibre chimique des fluides, aussi bien que leur équilibre physique, n'est qu'une illusion qui correspond à un régime permanent de transformations qui se compensent (1) ». M. J. Perrin ne croit pas qu'on puisse douter que ces fluctuations chimiques seront un jour perceptibles au microscope à grossissement suffisant

Enfin, des travaux scientifiques récents poursuivis par M. Georges Friedel, directeur de l'Institut des sciences géologiques de l'Université de Strasbourg, ont permis d'identifier de nouveaux états de la matière intermédiaires entre l'état liquide et l'état solide. Ces états, qui ont reçu le nom de mésomorphes, correspondent à des liquides dans lesquels les molécules, tout en conservant leur liberté de mouvement, seraient orientées d'une façon fixe.

Dans l'état nématique, les molécules seraient, ou toutes parallèles, ou rayonnantes, ou enroulées en spirale. Dans l'état smectique, plus proche de l'état solide, les molécules seraient en outre astreintes à se mettre en couches superposées. Ce dernier état, qui doit son nom au fait qu'il s'observe particulièrement chez les savons, donne lieu au très curieux phénomène des gouttes à gradins (2).

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

(1) Cf. J. PERRIN, op. cit., p. 202.

(2) Ces états de la matière sont décrits par M. Courtines dans son ouvrage déjà cité : Où en est la Physique ? Chap. VI, p. 139 et suiv.

Or, en observant au microscope en lumière polarisée certains de ces curieux liquides en état d'équilibre, M. Mauguin a remarqué « Une incessante scintillation, un fourmillement lumineux qui se manifeste en tous les points du champ, donnant une faible lumière qui varie rapidement de place en place et d'instant en instant (1) ».

(1) Cf. J. PERRIN, op. cit., p. 203.

M. J. Perrin voit avec M. Mauguin dans ce beau phénomène, des fluctuations de l'orientation moléculaire constituant une vérification directe du mouvement brownien.

Exigerons-nous une dernière vérification de la théorie cinétique ?

M. Einstein nous la fournit par la très belle théorie mathématique qu'il a donnée du mouvement brownien. Partant de la seule hypothèse que ce mouvement est parfaitement irrégulier, M. Einstein a démontré que le carré moyen du déplacement d'une molécule doit être proportionnel à la durée de ce déplacement; il a appelé activité du mouvement brownien ce coefficient de proportionnalité constant.

Or, cette belle théorie permet de retrouver, par des développements que nous ne pouvons aborder ici, le nombre de molécules, toujours le même, qui existe dans un même volume d'un gaz quelconque, dans les mêmes conditions de température et de pression, le fameux nombre d'Avogadro, dont il existe actuellement plus de quinze vérifications et sur lequel nous aurons à revenir un jour.



Tant d'impressionnantes vérifications imposent-elles cependant notre adhésion absolue et définitive à la théorie cinétique, si séduisante par la très belle unité qu'elle réalise entre les principes et les lois de la Physique des fluides et de la Thermodynamique ?

La rigueur absolue des sciences exactes ne permet pas encore de répondre affirmativement. Des ombres demeurent dans le tableau au sujet de l'interprétation des chocs des molécules : chocs élastiques, chocs mous, énergie dissipée dans ces chocs. La clarté complète ne semble devoir être faite qu'à la lumière des dernières données, encore en élaboration, sur la structure intime de l'atome.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Telle qu'elle se présente actuellement, la théorie cinétique comporte toutefois un degré d'exactitude d'une très haute probabilité. Et si la Physique de demain ne devait la sanctionner qu'avec certains amendements, cette belle théorie ne perdrait rien de son extrême fécondité en progrès scientifiques de premier ordre.

La philosophie générale pourra en retenir un nouvel exemple éclatant de l'illusion des sens. Si l'étude approfondie des sciences physiques et chimiques ne devait avoir pour résultat que de nous rompre à désolidariser des réalités des apparences, quelle portée philosophique et apologétique n'y trouverions-nous pas !

La philosophie des sciences, de son côté, retiendra particulièrement de la théorie cinétique la notion de loi statistique dont la portée dépasse de beaucoup le cadre étroit d'une théorie purement physique.

Pour nous qui avons précédemment parcouru le domaine de la Physique industrielle, cette notion nouvelle met en pleine lumière dans notre esprit la démarcation entre ce domaine et celui de la Physique purement scientifique et désintéressée. La première approfondit et met en pratique les grandes lois d'ensemble de la nature ; son domaine est donc spécifiquement celui des principes et des lois statistiques. La deuxième, éloignée de toute idée d'applications et poursuivant sans mélange la connaissance désintéressée, perce l'enveloppe statistique de la nature et s'efforce d'atteindre l'élément de matière, sa structure intime et les lois qui régissent ses mouvements internes.

La théorie cinétique nous a conduits au seuil de la molécule. Il nous resterait à suivre les physiciens modernes au cœur de cette molécule, puis au cœur de l'atome, puis au cœur de l'énergie, puis au cœur du noyau de l'atome, puis au cœur de l'électron, puis au cœur du proton.

Tenterons-nous la rude mais passionnante ascension du sommet réellement vertigineux des connaissances physiques modernes ? La joie des grandes ascensions, la très haute et très pure « joie de connaître » magnifiquement chantée par Termier, seuil si fréquent de la certitude religieuse pour tant d'esprits réellement scientifiques, vaut bien quelques efforts. Au surplus, nous serons à bonne et solide cordée avec des guides habitués au vertige et aux pas difficiles.

Et si le panorama, dont nous jouirons en haut, nous paraît encore d'un contour incertain et réduit, nous répéterons la parole d'Henri Andoyer que M. Emile Picard rappelait aux obsèques de ce grand astronome français, le 14 juin 1929 :

« Laissez-moi espérer et croire fermement que les savants, j'entends ceux qui passionnément consacrent leur vie entière à la science, ne peuvent manquer de trouver un jour leur récompense dans la complète intelligence de la vérité qu'ils ont toujours poursuivie. »

LES FOULES MOLÉCULAIRES

Cauchemar d'une nuit de fièvre.

Perdus au cœur d'une immense ville de rêve, nous nous épuisons à dénombrer la foule en délire qui, par milliards de milliards d'individus, court éperdue en tous sens, rebondissant sans répit de choc en choc.

Cette ville de rêve, c'est la gouttelette qui brille sur le bord de cette coupe. En elle la théorie cinétique, qui nous a présenté ses titres de créance, nous fait voir un nombre invraisemblable de particules d'eau en mouvement perpétuel et d'une telle petitesse que les dispositifs d'investigation ultra-microscopique les plus puissants n'ont pas encore permis de les voir directement, et encore moins de les compter sur le vif.

Notre curiosité n'en est que plus vive à l'égard de ces mystérieux petits individus, ces molécules, comme les ont appelés les physiciens du xviii^e siècle qui ont repris l'hypothèse de Démocrite sur l'existence de ces « petites masses », leur activité et leur rôle comme constituants de la matière universelle. Si notre œil est encore impuissant à les dénombrer directement, ne pourrions-nous au moins nous faire une idée de leur ordre de grandeur par l'observation directe et attentive de la nature ?

Notre regard s'attache aux aîtres familiers qui nous accueillent dans cette simple demeure de campagne. Ne nous ont-ils pas déjà conté une partie du secret intime de leur existence ? Dans le silence profond qui aiguise l'attention, nous sentons qu'ils sollicitent à nouveau nos questions, comme s'ils avaient encore quelque confiance importante à nous faire. Interrogeons-les donc une dernière fois avant de nous en séparer à regret pour poursuivre ensuite le grand secret des foules moléculaires dans les laboratoires où la nature disséquée subit la question.



Dehors, un grand bassin circulaire rempli d'eau bien propre où se mirent les arbres du jardin. Versons délicatement une goutte d'huile sur ce miroir d'eau qui dort. L'huile s'étale sur l'eau en lame mince décomposant la lumière du soleil qu'elle nous renvoie en irisations multicolores. S'étirant indéfiniment, elle gagne peu à peu toute la surface du bassin, perdant en épaisseur ce qu'elle gagne progressivement en étendue.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Lord Rayleigh, une des grandes figures de la science anglaise de la deuxième moitié du XIX^e siècle, pressentit la portée de cette observation familière et chercha à déterminer la plus petite quantité d'huile qui se trouverait juste suffisante pour recouvrir en entier un bassin rempli d'eau. La quantité qu'il trouva ainsi correspondait à une lame d'huile de 2 millièmes de millimètre d'épaisseur, 2 millimicrons !

Ses expériences furent reprises récemment par notre compatriote, M. Devaux, avec des moyens de laboratoire plus délicats. Cette fois, l'épaisseur d'huile descendit à un millimicron.

Toucherions-nous à la dimension d'une molécule d'huile ? Rien ne nous autorise encore à le croire et peut-être même en sommes-nous encore bien loin.

Cependant, une sphérule d'huile de cette dimension pèse un milliardième de milliardième de milligramme. Employons le langage facile et dénué d'emphase que l'algèbre met à notre disposition et écrivons simplement ce poids effroyablement petit : 10^{-21} gramme.



Regardons encore autour de nous. Voici un morceau de savon de Marseille ; savonnons-nous abondamment les mains, en tâchant de réussir entre le pouce et l'index formant anneau, une de ces lames minces qui nous rappellent les belles bulles de notre enfance et observons attentivement cette lame en la tenant verticalement. L'eau s'écoule graduellement vers le bas, tandis que la partie supérieure se met à changer de couleur. La voici pourpre, puis jaune paille.

Tiens ! Que sont ces taches noires qui grandissent, puis se réunissent en une plage obscure, gagnant le quart de l'anneau, jusqu'à ce que, brusquement, celui-ci se brise emportant son mystère ?

Il y a deux siècles et demi, ces taches intriguèrent le grand Newton. Les fixant, il y vit apparaître de nouvelles taches rondes encore plus sombres et à bords tellement nets que, de suite, l'idée dut lui venir, comme à nous-même, d'un changement brusque d'épaisseur. Mais l'illustre Anglais, enfant d'un siècle que dominait encore le vieil adage *Natura non facit saltus*, ne pouvait être effleuré par la pensée d'une variation discontinue dans la nature. Dans les taches sombres des lames de savon, seule, leur extrême minceur parut retenir son attention. Touchait-il à la plus faible épaisseur de matière ?

Ecartons nous-même pour le moment le problème du continu et du discontinu dans la nature, qui vient de se poser à nous si inopinément. Nous le verrons d'ailleurs bientôt surgir de tous les points de l'horizon des sciences modernes et s'imposer à nous d'une façon aiguë.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Pour pousser l'observation de ces lames de savon, il fallait les stabiliser. Un physicien, Dewar, réussit le délicat problème, en formant celles-ci sur des cadres fins dans une cage de verre les protégeant contre l'évaporation, et put les conserver ainsi pendant des mois. Dès lors, ces lames étaient prêtes pour l'autopsie au moyen des instruments de la physique mathématique.

M. Jean Perrin s'attacha à la question. Appliquant à ces plages noires la théorie des lames minces, il réussit en 1918 à mesurer leur pouvoir réflecteur d'où, par le calcul, il déduisit leur épaisseur. En même temps, au prix des soins minutieux et de l'inlassable patience que les physiciens savent apporter à leurs délicates manipulations, il obtenait des lames de savon comportant plus de cent gradins à bords nets.

Que sont donc ces étranges amphithéâtres et dans quelles profondeurs nous mènent leurs gradins ?

Pour nous en rendre compte, descendons avec M. Jean Perrin dans le plus noir de ces gouffres et mesurons son épaisseur centrale. Le résultat, 4 millimicrons et demi, est du même ordre de grandeur que celui précédemment trouvé par lord Rayleigh pour l'épaisseur des lames d'huile les plus minces répandues à la surface de l'eau.

Remontons maintenant, avec le professeur en Sorbonne, l'amphithéâtre aux cent gradins, en nous arrêtant avec lui à chaque degré pour en mesurer la hauteur. « Résultat bien remarquable ! », s'exclame le savant. Pour tous ces gradins, nous trouvons la même épaisseur, et cette épaisseur se trouve être un multiple entier de celle de la tache centrale la plus mince !

Allons jusqu'au bout de la conclusion au seuil de laquelle son extrême prudence arrête le maître. Ce multiple n'exprimerait-il pas un nombre entier de molécules, et les gradins du mystérieux amphithéâtre, dont les lames de savon nous donnent le spectacle, ne seraient-ils pas formés d'anneaux concentriques de molécules superposées par couches de quelques unités seulement, avec, au centre, une pellicule formée, peut-être, d'un seul rang de molécules ?

Belle vision, mais que rien ne distingue encore d'un mirage. Au lieu d'une couche monocellulaire, rien ne nous autorise à penser que nous n'avons pas affaire à une couche épaisse de matière et qu'il ne nous faudra pas descendre encore beaucoup plus bas peut-être sur l'échelle des grandeurs pour atteindre cette petite masse de matière, cette molécule, dont nous affirmons l'existence et que nous voulons dénombrer, mesurer et peser.



La nuit est donc encore bien noire, et la pâle clarté qui tombe de nos

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

connaissances scientifiques laisse à peine deviner la masse générale du sommet, vierge encore, pour de longs siècles peut-être, des connaissances accessibles à l'homme sur la matière et l'énergie.

L'exploration du domaine des lames minces, que nous venons de faire, montre que l'observation directe de la matière amincie à l'extrême est actuellement sans issue certaine vers la molécule, telle une cheminée inaccessible se perdant indistincte dans la muraille de la montagne.

Du point où nous a conduits la théorie cinétique, nous n'apercevons donc aucune voie d'ascension directe vers le recensement des foules moléculaires et encore moins, au delà, vers l'anatomie de ces foules.

Force sera donc, pour progresser, de trouver une voie détournée.

Dans la cordée d'hommes de science à laquelle nous nous mêlons, nous avons déjà reconnu des physiciens et des mathématiciens. Avec eux nous avons atteint, à la théorie cinétique, l'étape que, du bas de la montagne, un philosophe antique, Démocrite, avait indiquée il y a vingt-cinq siècles. Voici maintenant que vont prendre rang des chimistes. Guidés par cette lignée nouvelle, appelée à s'illustrer, nous nous engageons dans une voie en apparence complètement étrangère au but, mais qui devait se montrer plus tard la véritable voie d'ascension vers la constitution intime de la matière.

Il y a plus de cent ans déjà, la chimie moderne faisait son entrée triomphale dans le cercle des sciences exactes par une série de conquêtes dignes de l'épopée napoléonienne dont elles étaient contemporaines.

1775. Le grand Lavoisier ouvre magistralement la voie en établissant, balance en main, que, dans les transformations chimiques, « rien ne se perd, rien ne se crée ». C'est la grande loi de la conservation de la matière.

1806. Proust d'Angers est conduit par ses recherches à porter un coup droit au vieil adage : *Natura non facit saltus*. Les proportions suivant lesquelles deux corps se combinent, déclare-t-il en substance, ne peuvent pas varier de façon continue, mais se limitent à un petit nombre de valeurs fixes. C'est la loi des proportions définies, qui déclenche entre Proust et son collègue savoyard, Berthollet, une controverse ardente et célèbre, épisode de la grande bataille entre le continu et le discontinu, qui, sur le front de la chimie, durera cinquante ans, jusqu'à ce que les mémorables travaux de Marcelin Berthelot et de Henri Sainte-Claire Deville sur les équilibres chimiques montrent la possibilité de variations réversibles continues à côté des combinaisons définies irréversibles.

1807. John Dalton, gloire de la science anglaise, franchit une étape magistrale dans la voie ouverte par notre compatriote Proust, en énonçant la loi des proportions multiples. Et voici que le caractère arithmétique si nouveau des lois qui viennent de lui apparaître ainsi qu'à son collègue français Proust, illumine l'intelligence du grand savant anglais d'une intuition géniale sur l'essence intime de la matière.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Chacune des substances élémentaires, énonce-t-il (1), dont se composent les divers corps est formée par une sorte déterminée de particules toutes rigoureusement identiques, particules qui traversent, sans se laisser jamais subdiviser, les diverses transformations chimiques ou physiques que nous savons provoquer, et qui, insécables par ces moyens d'action, peuvent donc être appelées des atomes, dans le sens étymologique.

(1) Suivant la traduction que M. J. Perrin a donnée de sa pensée dans son ouvrage *Les Atomes*.

Puis, complètement, à lui seul, l'illustre Dalton, dans son mémorable ouvrage *A new system of chemical philosophy*, édifie la théorie atomique avec ses notions de poids atomique et de poids moléculaire, véritable statut de la chimie moderne, qui mettra plus d'un demi-siècle à vaincre indifférence et hostilité.

1808. Gay-Lussac, enfin, après ses expériences célèbres avec l'explorateur allemand Alexandre de Humboldt, en conclut la loi des combinaisons en volume : Les volumes de gaz qui apparaissent ou disparaissent dans une réaction sont entre eux dans des rapports simples.



Rapports simples en poids, rapports simples en volume ! Quelle nouvelle réalité profonde se dissimule derrière ces sauts répétés de nombre entier en nombre entier, qui apparaissent dans la nature en dépit du vieil adage : *Natura non facit saltus* ?

Le cycle complet des lois numériques fondamentales de la chimie qui vient de se clore travaille ainsi la pensée du physicien Avogadro jusqu'au jour de l'an de gloire 1811 où la synthèse de ces lois chimiques se fait dans son cerveau sous la forme de la réalité physique suivante :

« Des volumes égaux de n'importe quels gaz, à même température et pression, contiennent le même nombre de molécules. »

Nombre mystérieux qui, cent ans après cette affirmation d'Avogadro, devait jeter un tel lustre scientifique sur le nom de ce physicien ! Pas plus que celle de Dalton, la vision d'Avogadro ne suscite l'attention contemporaine, à tel point que notre grand Ampère qui, dans un accès de distraction sans doute, n'a pas régulièrement suivi le *Journal de Physique* en 1811, l'ignore complètement.

De son côté cependant, la curieuse arithmétique des grandes lois statistiques de la chimie travaille son génie. Par un phénomène intellectuel que nous retrouvons plusieurs fois dans l'histoire des sciences, les mêmes prémisses aboutissent dans l'esprit des deux savants aux mêmes conclusions d'une façon complètement indépendante, et voici que, trois ans plus tard, Ampère communique à Berthollet exactement la même hypothèse qu'Avogadro et la publie de bonne foi dans les *Annales de Chimie et de Physique* de 1814 !

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Ampère, dont la maison natale à Poleymieux, au Mont-d'Or, vient d'être sauvée de l'oubli par deux Américains et transformée en Musée d'Electricité, venait d'être admis à l'Institut et entré dans la célébrité. L'autorité de l'illustre savant ne suffit cependant pas pour susciter la curiosité autour de l'hypothèse d'Avogadro que son génie venait de sanctionner. Les chimistes contemporains refusèrent d'y voir une réalité physique et n'en retinrent qu'une règle commode de calcul chimique, la règle d'Avogadro et d'Ampère, tant le fardeau de la continuité pesait lourdement sur le génie scientifique de l'époque et fermait les yeux sur la réalité objective des molécules et des atomes. Danger des formules anesthésiantes !

Trois quarts de siècle devront passer avant que la célèbre hypothèse éveille l'attention du monde savant. Et, cependant, voici un ballon de verre d'une capacité de 22 l. 32. Remplissons-le successivement, à la pression atmosphérique, de tous les gaz que nous connaissons. Chaque fois, le ballon contiendra une masse de gaz égale à son poids moléculaire, une molécule-gramme, comme disent les chimistes. Mais chaque fois aussi, affirment Avogadro et Ampère, le ballon contiendra le même nombre de molécules, de particules réelles, le nombre d'Avogadro.

Suivons l'idée qui chemine dans notre esprit. Qu'un corps soit gazeux, liquide ou solide, la masse de ses molécules ne saurait changer. Si donc nous connaissions ce mystérieux nombre d'Avogadro, du coup serait fait pour nous le recensement des molécules qui, pour n'importe quel corps, et quel que soit son état, se trouvent dans son poids moléculaire ! Une simple proportion nous donnera ensuite le nombre de molécules réelles contenu dans n'importe quel poids de ce corps.

Avec quelle curiosité notre regard se reporte maintenant sur la petite goutte d'eau qui accroche la lumière au bord de la coupe ! C'est le recensement de ses foules moléculaires en délire que nous donnera le nombre d'Avogadro.

Lançons-nous donc à la conquête de ce nombre fameux, en emboîtant le pas aux physiciens qui s'y sont acharnés dès la fin du siècle dernier !



A cette étape de l'ascension, la cordée s'enrichit d'une nouvelle catégorie de chercheurs, les électriciens et, à leur tête, Michel Faraday, auquel l'Angleterre donna le jour en 1791.

C'est dans le laboratoire de sir Humphrey Davy à l'Institut royal de Londres, que Michel Faraday nous fait entrer avec lui, en 1813. A l'école de ce maître, Faraday s'est attaqué aux actions chimiques du galvanisme, ou, comme l'on dira plus tard, à l'électrolyse. Nous le voyons penché sur une cuve remplie d'une solution de sulfate de cuivre qu'il décompose en y faisant passer le courant d'une pile

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

voltaïque.

De grands noms : Galvani, Volta, Humboldt, Ritter, Davy, s'étaient déjà attachés soit au galvanisme, soit à ses actions chimiques.

Faraday, le premier, mettant à profit les travaux de notre compatriote Ch.-Aug. de Coulomb sur les mesures électriques, a l'idée de mesurer la quantité d'électricité qui passe dans la solution saline en décomposition et de la comparer à la quantité de métal libérée.

Le 31 décembre 1833, il a la joie de découvrir que toutes les fois qu'un même poids de cuivre est transporté d'une électrode à l'autre, la même quantité d'électricité a traversé la cuve. Il opère ensuite sur un sel d'argent, puis de tous les autres métaux ; la même proportionnalité lui apparaît.

Bien plus, les proportions des métaux libérées et les quantités d'électricité en action sont telles que quel que soit le métal, il faut toujours une quantité d'électricité égale à 96.340 coulombs pour transporter une valence-gramme du métal, c'est-à-dire son poids atomique rapporté à l'unité de valence chimique.

Quel lien mystérieux entre la matière et l'électricité fait apparaître cette law of definite action que le génie de Faraday lègue ainsi aux recherches passionnées de ses successeurs ?

Tout se passe donc, dans l'électrolyse d'une solution saline, comme si chaque valence-gramme du métal transportait toujours la même quantité d'électricité, la constante de Faraday, comme celle-ci est nommée, en mémoire de son illustre inventeur.

Et voici qu'à notre esprit revient ce nombre d'Avogadro qui aura hanté tant de nuits d'hommes de science, avec cette lettre initiale N que la tradition scientifique lui a consacrée. Si vraiment les poids moléculaires de tous les corps contiennent toujours le même nombre N de molécules réelles, la conclusion suivante de la loi de Faraday s'impose à notre esprit : chaque petite molécule de métal monovalent transporte donc toujours dans l'électrolyse la même petite quantité d'électricité.

Ainsi apparaît l'existence d'une quantité élémentaire d'électricité liée dans l'électrolyse à l'élément de matière, petite quantité à laquelle le physicien Johnstone Stoney a donné le nom d'électron dans un mémoire publié à Dublin en 1891.

Le jour où, par une voie quelconque, nous aurons atteint la valeur numérique de cet électron, une simple division de la constante de Faraday par cette valeur nous donnera du même coup le nombre d'Avogadro, objet de nos ardentes recherches.

Voici donc le problème du recensement des foules moléculaires transporté dans le domaine de l'électricité pure. Nous ne nous en étonnerons plus lorsque nous entreverrons que la substance intime de la matière est peut-être de nature essentiellement électrique.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Problème déplacé, dirons-nous, n'est pas problème résolu. Mais la science des alpinistes ne consiste-t-elle pas à tâter la montagne par toutes ses faces avant de risquer l'attaque définitive par la voie d'ascension en apparence la plus détournée ?



Le sentier où nous engageant maintenant les électriciens prend naissance dans les origines déjà lointaines de leur science.

Saisissons le vieux traité de physique qui dort, oublié, dans la retraite de cette bibliothèque d'autrefois, et laissons-nous aller au charme des délicates gravures par lesquelles nos ancêtres ont fixé le témoignage des manifestations premières de l'électricité. Voici d'étranges poupées en moelle de sureau, habillées de papier de soie, qui dansent entre deux plateaux métalliques reliés aux deux pôles d'une machine électrique. D'où vient qu'au parfum enchanté des Mille et une nuits que dégage cette page, se joint pour nous un intérêt tout nouveau intimement lié à nos recherches actuelles ?

Les mystérieux petits fantoches transportent des charges électriques qui les attirent successivement d'un plateau à l'autre. Si nous essayions de réaliser des pantins minuscules assez petits pour que la charge d'électricité dont ils seront porteurs se rapproche de l'élément d'électricité, de cet électron que nous voulons conquérir ?

Tel est le problème auquel s'attachèrent à la fin du XIX^e siècle les physiciens du Cavendish Laboratory de Cambridge.

Les dernières années de ce siècle venaient d'être marquées d'événements scientifiques mémorables, préparant les voies aux recherches des savants britanniques.

1895. En Allemagne, Roentgen découvre les rayons X.

1896. En France, M. Jean Perrin montre que ces rayons produisent dans les gaz qu'ils traversent des centres chargés d'électricité des deux signes, auxquels, en raison de leur mobilité, on donne le nom d'ions, sans que l'on connaisse encore leur nature. Il parvient, en soumettant les gaz ainsi ionisés à l'action d'un champ électrique, à séparer les ions positifs des ions négatifs et à les empêcher de se recombiner.

L'école de Cambridge tient ainsi la matière de ses expériences. Dès 1897, Townsend, du laboratoire Cavendish, montre que, dans l'air humide ionisé, les ions facilitent la formation de brouillards. Il émet l'hypothèse que chaque ion donne naissance à une gouttelette de brouillard ; puis il se met à observer la lente chute d'un de ces brouillards sous l'action de la pesanteur et il se dit que, s'il

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

parvient à mesurer le poids total du brouillard, le poids d'une gouttelette par sa vitesse de chute et enfin la charge électrique totale du gaz, il atteindra, par une simple opération arithmétique, la charge moyenne d'électricité transportée par un ion. Les recherches de Townsend sont entachées d'hypothèses incertaines et d'erreurs; mais il a indiqué la méthode.

Sir Joseph Thomson reprend les travaux de son élève et les améliore sans faire disparaître les causes d'incertitude. Mais la ténacité britannique qui s'affirme au Foreign Office, sur la route des Indes comme sur les pentes de l'Everest, se retrouve la même au fond du laboratoire Cavendish.

En 1903, H. A. Wilson, du même laboratoire, apporte à la méthode de Townsend et de J. Thomson un progrès capital. Au lieu d'observer la chute libre du brouillard, il enferme celui-ci entre deux plateaux électrisés. Le champ électrique ainsi créé réagit sur la charge d'électricité portée par chaque gouttelette et retarde ou accélère sa chute; Wilson mesure ces variations de vitesse et en déduit la charge électrique de chaque gouttelette par application des lois de la pesanteur, et de l'attraction électrique.

Ainsi a-t-il éliminé l'hypothèse très incertaine que chaque goutte ne porte qu'un seul ion. Mais d'autres incertitudes graves subsistent, qui se traduisent par des divergences importantes dans les résultats.

Malgré la ténacité de ses leaders successifs, la cordée britannique, acharnée à la conquête de l'électron, se heurte donc à un gendarme sérieux qui barre l'arête sur laquelle elle a progressé jusqu'ici.



A ce moment, l'initiative traverse l'Atlantique, et nous voyons entrer en action un physicien du nouveau monde, Robert Andrews Millikan, directeur du laboratoire de physique Norman Bridge, à Pasadena (Californie), et professeur honoraire à l'Université de Chicago.

Millikan, prenant la tête de la cordée, devait illustrer son nom et la physique américaine en venant à bout, avec une rare maîtrise, des difficultés qui arrêtaient l'équipe anglaise et en faisant brillamment la conquête d'un des plus hauts sommets de la physique moderne.

Suivons-le rapidement d'après le récit qu'il a fait de ses travaux dans son ouvrage, l'Elektron (1).

(1) L'Elektron, par R.-A. Millikan. Traduit par Lepape. Librairie Alcan, 1925.

En cherchant à écarter méthodiquement les difficultés qui faussaient les résultats de ses devanciers britanniques, Millikan est amené à arrêter la chute du

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

brouillard en équilibrant son poids par un champ électrique attirant assez fortement les gouttelettes vers le plateau supérieur.

L'œil au microscope, Millikan aperçoit un firmament de nuit d'août, chargé d'étoiles serrées et de nébuleuses qui sont les millions de gouttes de brouillard éclairées latéralement. A volonté, il fait monter et descendre entre les deux plateaux ces constellations innombrables.

Etranges petits fantoches habillés de soie, qui dansez entre les feuillets des vieux traités de physique, avez-vous pris la forme d'étoiles pour retrouver votre place dans les laboratoires modernes ?

Puis, nous voyons notre savant américain régler le champ électrique de façon à obtenir une immobilisation relative du brouillard. Les gouttelettes trop lourdes tombent ; celles trop chargées électriquement gagnent violemment le plateau supérieur.

Au bout de sept à huit secondes, raconte-t-il dans le Philosophical Magazine de février 1910, le champ d'examen était très net et ne contenait plus qu'un nombre relativement petit de gouttes, dont le rapport de la charge à la masse était tel qu'elles se maintenaient suspendues sous l'action du champ électrique. Ces gouttes apparaissaient comme des points brillants parfaitement distincts. J'ai plusieurs fois obtenu une seule de ces étoiles dans tout le champ et je l'y ai maintenue pendant plusieurs minutes.

Or, un jour de l'année 1909, dans le silence du laboratoire, le physicien américain eut une émotion scientifique intense, privilège de ceux qu'a touchés « la Vocation de Savant ». Il suivait passionnément une de ces gouttes évoluant dans le champ électrique soumis aux rayons X, pour en mesurer la vitesse, lorsque brusquement il voit la petite étoile changer de vitesse ; cette autre goutte jusqu'ici immobile, la voici qui soudain part vers le haut ; puis cette autre vers le bas. Il lui faut changer le réglage du champ électrique pour immobiliser à nouveau chaque petite étoile.

La charge électrique de ces gouttes a donc brusquement changé ! « C'est évidemment, écrit Millikan, parce que ces gouttes se sont emparées au passage soit d'un ion positif, soit d'un ion négatif. » Puis, la conclusion se précise dans l'esprit du physicien américain sous la forme d'une nouvelle méthode expérimentale plus précise à adopter :

Ceci me fit entrevoir la possibilité de mesurer avec certitude, non seulement la charge des gouttelettes isolées comme je l'avais fait jusqu'alors, mais la charge portée par un seul ion atmosphérique. En effectuant, en effet, deux mesures de vitesse sur la même goutte, l'une avant qu'elle ait capté un ion, l'autre après cette capture, il m'était évidemment possible d'éliminer entièrement les propriétés de la goutte et celle du milieu et d'opérer sur une quantité directement proportionnelle à la charge de l'ion capturé lui-même (1).

(1) L'Elektron, Millikan. Alcan, p. 76.

Millikan vient de vaincre ainsi l'obstacle qui a arrêté l'équipe de Cambridge. Continuons à le suivre sur la voie difficile qui, maintenant, va le conduire droit au

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

but. La nouvelle méthode qu'il vient d'entrevoir se précise rapidement dans son esprit. Il va maintenant opérer sur des gouttelettes d'huile électrisées en s'attachant à isoler l'une d'elles et à la faire évoluer solitaire entre les deux plateaux d'un condensateur. Dans le champ de sa lunette, il suivra la petite goutte et notera les temps successifs qu'elle mettra à parcourir un espace de 5^{mm}.

Le succès récompense sa remarquable maîtrise en confirmant ses présomptions. Les temps successifs qu'il observe sont tous multiples simples d'une même durée, apportant la preuve que les charges capturées ou libérées, par une ou plusieurs à la fois, sont toutes égales.

Vingt fois, cent fois, l'action de ces petites charges élémentaires d'électricité, toujours égales, se manifeste à ses yeux, quel que soit le mode d'électrisation des gouttelettes. Et peu à peu les résultats tous concordants de ses expériences imposent à son esprit la conclusion que l'électricité a une constitution granulaire.

Toute charge électrique, finit-il par énoncer, envisagée sur un isolant ou sur un conducteur, dans des électrolytes ou des métaux, consiste en un nombre entier de grains d'électricité, tous parfaitement semblables.

A ce grain d'électricité, Millikan prête une existence objective et assigne le nom d'électron, par lequel, douze ans auparavant, J. Stonay n'avait voulu désigner que l'unité élémentaire de quantité d'électricité. Il voit ces électrons s'écouler le long des fils qui alimentent nos lampes et nos moteurs ; il compte ceux qui, pendant une seconde, passent dans le filament d'une lampe de seize bougies. Il nous effraie en nous précisant que...

... Si les deux millions et demi d'habitants de Chicago devaient compter ces électrons chacun à la vitesse de deux électrons par seconde, et, cela sans jamais s'arrêter, ni pour manger, dormir ou mourir, il leur faudrait exactement vingt mille ans pour accomplir ce travail (!) !

(!) L'Elektron, Millikan. Alcan, p. 143.

Sans crainte, le physicien américain affirmait ainsi la constitution atomique de l'électricité, comme Dalton, cent ans plus tôt exactement, avait affirmé avec la même audace la constitution atomique de la matière.



Arrêtons-nous un instant à cette nouvelle théorie des électrons à laquelle Millikan venait ainsi de donner le jour en conclusion de ses belles expériences. Nous verrons bientôt à quel essor brillant elle était appelée, d'autant plus aisément que la théorie atomique et la théorie récente des quanta avaient préparé les esprits à l'idée des grains d'énergie, comme à celle des grains de matière.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Une nouvelle phase de la lutte séculaire du continu et du discontinu venait de s'ouvrir avec éclat sur le front de l'électricité, pendant que d'autres se déclenchaient simultanément sur le front de la lumière, des radiations, du magnétisme. A l'éther continu, élastique et vibrant d'Huyghens, de Fresnel et de Maxwell, splendide dans son unité et triomphant dans ses confirmations multiples, venaient s'affronter, en vagues d'assaut répétées, tous les néo-grains discontinus d'énergie, l'électron, le photon, le magnéton, etc., conçus par les physiciens de la nouvelle école de Newton.

Laissons pour le moment Louis de Broglie travailler à l'arbitrage de ce conflit grandiose par sa magistrale Mécanique ondulatoire.

Malgré ses éclatants succès, la théorie des électrons n'est d'ailleurs pas restée sans critiques extrêmement sérieuses et solidement fondées de la part de grands esprits, alliant une très haute culture scientifique à une égale formation philosophique.

Dans un mémoire peu connu, quoique remarquable, présenté en juin 1916 à la Société internationale des Électriciens, M. Daniel Berthelot, analysant d'un point de vue philosophique et scientifique très élevé l'essence des différentes formes d'énergie, fut appelé à faire la critique de la nouvelle théorie.

Pour lui, il ne peut y avoir de charge électrique définie, de quantum d'électricité, que...

... Lorsque l'électricité est associée à la matière (loi des équivalents électrochimiques de Faraday), de même que l'espace se présente par quanta (loi des équivalents volumochimiques de Gay-Lussac) quand il est lié à la matière (1).

La structure discontinue, ajoute-t-il, existe pour toutes les formes d'énergie en vertu de la loi des capacités moléculaires équivalentes, quand elles sont liées à la matière. Elle est vraie aussi bien pour l'énergie électrique ou magnétique que pour l'énergie de volume des gaz, pour l'énergie capillaire ou énergie de surface des liquides, pour l'énergie thermique, pour l'énergie radiante, etc.

En revanche, cette structure discontinue cesse d'exister dès qu'il n'y a plus de support matériel. En dehors des systèmes gazeux, l'espace n'a plus la structure discontinue indiquée par la loi de Gay-Lussac ; en dehors des systèmes conducteurs, tels que les métaux et les solutions salines, l'électricité n'a plus la structure discontinue indiquée par la loi de Faraday.

(1) Bulletin de la Société internationale des Électriciens, t. VI, n° 55, 1916, p. 340.

M. Daniel Berthelot, que la mort a trop rapidement ravi à la science française il y a quelques années, arbitre le grand conflit du continu et du discontinu en prenant position entre les lignes adverses, dans le no man's land. Critiquant le caractère absolu des positions extrêmes prises par les savants divisés, l'homme de science philosophe s'écrie :

C'est là un exemple de ce travers d'esprit qui veut tout ramener à un moule uniforme. Pourquoi ne pas dire tout simplement que, dans la nature, à côté des processus continus, il y a des processus discontinus (1) ?

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Sage position philosophique à laquelle nous nous sentons vivement tentés d'adhérer ! Nous y trouvons le reflet des mémorables travaux de Marcelin Berthelot, père de l'auteur, sur les équilibres chimiques qui, nous le savons, ont montré en chimie la réalité des processus continus de la dissociation à côté des classiques réactions discontinues.

(1) Bulletin cité, p. 487.

Mais suivons Daniel Berthelot dans le tableau qu'il brosse de sa conception :

Dans la matière toutes les formes d'énergie prennent une structure discontinue ; en dehors de la matière, elles reprennent la forme continue. Mais ce passage du discontinu au continu ne peut se faire instantanément.

Pour illustrer le phénomène par une comparaison, nous pouvons dire que tout se passe comme dans une cave, où se trouveraient empilées des bouteilles d'une capacité uniforme, des cylindres d'un litre par exemple. Imaginons-les remplies d'eau et fermées par des couvercles ; puis supposons que la cave soit inondée. A l'intérieur des cylindres, le fluide aqueux se trouvera réparti par quanta, par unités élémentaires d'un litre. A l'extérieur, il existera à l'état continu. Le casier rempli de bouteilles représente la matière ; le reste de la case représente l'éther.

Imaginons maintenant qu'on donne sur le fond des cylindres un choc violent ; le couvercle sautera et le liquide intérieur se répandra à l'extérieur. Il passera de la forme continue à la forme discontinue. Mais ce passage ne se fera pas instantanément. Plus le choc aura été violent, plus le contenu de la bouteille conservera longtemps son individualité...

J'ai cité déjà le cas de cette poche d'air qui, dans l'explosion d'une locomotive survenue il y a quelques années, gare Saint-Lazare, traversa de part en part les vitres de plusieurs fenêtres successives sans se mélanger à l'air extérieur.

C'est ce qui se produit avec les électrons...

Pratiquement, les électrons disparaissent très vite après avoir quitté la matière en retournant dans le grand réservoir énergétique que constitue l'espace vide (l'éther) ; et l'on ne pourrait pas citer un seul fait expérimental à l'appui de l'hypothèse d'un électron voyageant dans l'éther pendant une distance illimitée (1).

Ces lignes de Daniel Berthelot ne prennent toute leur force que dans le cadre entier de son très beau mémoire auquel nous aurons l'occasion de revenir.

(1) Mémoire cité, p. 521 sqq.

Mais, dès maintenant, la prudence semble nous obliger à ne considérer la théorie des électrons comme solidement établie qu'au sein de la matière et à laisser droit de cité complet à la magistrale conception électromagnétique de Maxwell et de Hertz au sein de l'éther du vide.

Ainsi limitée au domaine de la matière, la théorie électronique de Millikan ne perdrait, d'ailleurs, rien de son immense portée.



BIED-CHARRETON.
DE LA TURBINE A L'ATOME.

Mais il est temps de cesser notre flânerie dans le domaine philosophique où nous nous sommes laissé entraîner, pour reprendre notre marche en avant vers le nombre d'Avogadro.

Le but immédiat que nous poursuivons avec Millikan c'est la valeur numérique de cet électron qu'il vient de mettre en évidence devant nous. Nous n'en sommes plus qu'à quelques pas.

Avec une technique d'une remarquable précision et aussi, il faut le dire, à la grande pitié de nos laboratoires, avec les moyens matériels puissants que les Américains savent mettre au service de la science pure, Millikan isole et élimine chacune des dernières erreurs d'expérience possibles. Finalement, il arrête définitivement ses notes de calcul en assignant à l'électron la valeur

$$4,774 \times 10^{-10} \text{ unité absolue électrostatique.}$$

Ce nombre trop petit, l'unité trop abstraite qu'il accompagne, rendent la valeur qu'ils expriment à eux deux irréalisable par notre imagination. Nous nous sentons vaguement anxieux dans un site à l'aspect irréel. Mais, en montagne, c'est souvent au moment où l'on est tenté de s'arrêter à bout de forces que l'on touche en réalité au but final.

Rappelons-nous que nous devons atteindre le nombre d'Avogadro, objet de nos recherches, en divisant la constante de Faraday par la valeur de l'électron.

La constante de Faraday, nous la connaissons par le grand physicien anglais. La valeur de l'électron, nous venons de la conquérir avec son collègue américain.

La division de l'un par l'autre nous donne :

$$N = 620\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$$

Rendons lisible par l'algèbre ce nombre illisible par l'arithmétique :

$$N = 62 \times 10^{22}.$$

Tel est enfin ce nombre d'Avogadro, c'est-à-dire le nombre de molécules que contient le poids moléculaire de tous les corps de la nature.



De quel éclat brille à nos yeux la petite goutte de rosée suspendue à la pointe du rocher, tandis que nous posons le pied sur le sommet péniblement convoité ! Nous perçons maintenant le secret des foules moléculaires qui la composent. A peine pèse-t-elle un dixième de gramme, c'est-à-dire qu'il en faudrait 180 pour

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

atteindre le poids moléculaire de l'eau. Une simple division du nombre d'Avogadro par 180 et nous avons le dénombrement de ce petit monde : 34×10^{20} , plus d'un million de fois la population du globe. Tel est donc le nombre des petits individus qui, dans cette sphérule, courent follement en tous sens, en proie à une agitation sans fin, sans que nous apercevions autre chose qu'une gouttelette cristalline suspendue inerte à la pointe du rocher.

Et rêveur, notre regard fait un tour d'horizon. Cette roche aérienne qui nous porte, ces autres sommets, ces glaciers, ces champs de neige ; plus bas, ces alpages, puis ces masses sombres qui se perdent dans les fonds ; plus loin encore, là où nous ne voyons plus que par l'esprit, jusque dans les espaces infinis de l'Univers, dont nous connaissons les espèces chimiques, foules moléculaires dont la multitude effraye, la physique moderne les aurait-elle identifiées et dénombrées ?

La voie détournée par laquelle nous sommes parvenus à la détermination du nombre d'Avogadro, clé de ces foules, autoriserait facilement des doutes sur l'exactitude du résultat. Dans une telle suite d'observations, d'expériences, de calculs, de déductions, d'inductions, des erreurs ne se sont-elles pas glissées ?

Nous ne serons sûrs de ce nombre que lorsque d'autres déterminations seront venues confirmer son exactitude par des voies différentes. Dépouillons donc les annales des vingt dernières années de la physique. M. Jean Perrin, dont les travaux sur la physique moléculaire font si grand honneur à notre pays, a fait ce dépouillement et a rassemblé en un tableau saisissant, dans son livre les Atomes, les divers phénomènes dont l'étude a conduit à la détermination du nombre d'Avogadro (1).

(1) J. PERRIN, Les Atomes. Alcan, p. 295.

Le nombre de ces phénomènes s'élève à seize ; et les seize déterminations du fameux nombre ainsi effectuées par les voies les plus diverses sont toutes comprises entre

60×10^{22} et 75×10^{22} .

On est saisi d'admiration, pouvons-nous dire avec M. J. Perrin, devant le miracle de concordances aussi précises à partir de phénomènes si différents. D'abord qu'on retrouve la même grandeur, pour chacune des méthodes, en variant autant que possible les conditions de son application, puis que les nombres ainsi définis sans ambiguïté par tant de méthodes coïncident, cela donne à la réalité moléculaire une vraisemblance bien voisine de la certitude.

Reposons-nous sur cette certitude avec les précautions et la vigilance que comporte toute certitude humaine ; et, pour finir, écoutons encore M. J. Perrin nous résumer ce que nous savons maintenant de la vie extérieure de ces molécules dont le mystère commence à s'éclaircir à nos yeux :

Chacune des molécules de l'air que nous respirons se meut avec la vitesse d'une balle de fusil, parcourt en ligne droite entre deux chocs à peu près 1 dix-millième de millimètre,

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

est déviée de sa course 5 milliards de fois par seconde, et pourrait, en s'arrêtant, élever de sa hauteur une poussière encore visible au microscope (mouvement brownien). Il y en a 30 milliards de milliards dans 1cm^3 d'air, pris dans les conditions normales. Il en faut ranger 3 millions en file rectiligne pour faire 1mm . Il en faut réunir 20 milliards pour faire 1 milliardième de milligramme.

Au terme de notre longue course à travers la physique moléculaire, notre pensée se reporte vers les minces lames d'huile répandues sur notre miroir d'eau et les plages noires apparues en amphithéâtre au centre de nos lames de savon. Leur épaisseur se rapprochait donc réellement des dimensions moléculaires, et n'étions-nous pas vraiment autorisés à entrevoir dans ces lames extra-minces, sinon des couches monocellulaires, tout au moins des édifices composés de quelques dizaines, quelques centaines de molécules superposées au maximum ?



Avant de reprendre demain notre ascension vers d'autres sommets, laissons-nous aller à la douceur du soir qui s'élève lentement vers les sommets.

De nous avoir chuchoté un rien de son secret, l'air a-t-il perdu de sa pureté, le bleu du ciel de sa profondeur, la crête aérienne de neige et de roc

Qui se perd sous le bleu des cieux démesurés

dans le rose, puis le gris, puis l'ombre opaque, a-t-elle cédé de son attrait ?

Et cette scène splendidement harmonieuse de la nuit qui vient sur la montagne, n'en chante-t-elle pas, au contraire, d'une voix plus limpide, la gloire de son Créateur ?

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

LE RADIUM. L'ANATOMIE DE L'ATOME

Février 1896, dans le laboratoire du professeur Henri Becquerel. L'attention du maître est concentrée sur ce rayonnement nouveau que Röntgen a découvert l'année précédente, et dont la renommée fait le tour du monde sous le nom de rayons X.

D'autres rayonnements, issus d'autres sources que le passage de la décharge électrique dans les grands vides, ne seraient-ils pas également capables de traverser des substances opaques jusqu'à des épaisseurs de 15^{mm} d'aluminium et de 3^{cm} de bois ? Le rayonnement de certaines substances phosphorescentes, par exemple ?

Et voici qu'Henri Becquerel reprend les expériences entreprises par ses devanciers du xvii^e siècle sur les « pierres lumineuses ».

Hasard ou intuition ? Le sulfate d'uranium, parmi tant d'autres substances phosphorescentes, a retenu l'attention du physicien. Sur une plaque photographique enveloppée dans un épais carton noir, il place un fragment de ce sel après l'avoir exposé plusieurs heures à la lumière du soleil.

L'expérience sera-t-elle positive ? Il découvre la plaque, la développe et l'examine. Effectivement, voici qu'apparaît sur la gélatine la silhouette du morceau phosphorescent.

Le 24 février, Henri Becquerel fait part de sa découverte à ses collègues de l'Académie des Sciences : la phosphorescence du sulfate d'urane traverse les corps opaques comme les rayons X.

A la séance du 2 mars, il revient sur la question. Un fait nouveau important vient de se produire : le morceau d'urane, conservé plusieurs jours dans l'obscurité, a de nouveau impressionné la plaque photographique enveloppée. Cette fois, il ne s'agit plus, semble-t-il, de rayons empruntés au soleil. Une observation de longue durée s'impose.

Le physicien introduit des fragments de sel d'urane dans un tube de verre qu'il scelle sur une lamelle de microscope. Puis, il renferme le tout dans une double boîte et l'abandonne pour des mois dans une salle obscure où la lumière du jour ne pénètre jamais.

Huit mois se passent. Henri Becquerel finit par entrouvrir le ténébreux local ; il prend la petite boîte et la pose sur une plaque photographique. Emotion ! La

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

plaque enregistre encore la silhouette de l'étonnante petite substance. Ce n'est pas tout. Röntgen avait montré que l'air traversé par les rayons X décharge un électroscope sur lequel on l'insuffle. En serait-il de même pour les rayons émis par l'urane ? Effectivement.

Pour bien s'assurer que c'est le métal uranium lui-même, et non son composé, qui émet en permanence ce rayonnement si voisin des rayons X, H. Becquerel recommence l'expérience, en prenant cette fois un petit bloc métallique contenant 95 % de métal uranium et que lui a préparé Moissan au four électrique. Même effet !

La séance de la Société française de Physique du 20 novembre 1896, qui entendit l'exposé de ces résultats, demeurera dans les fastes de la savante assemblée : Henri Becquerel, fils et continuateur d'Edmond Becquerel, fils et continuateur d'A.-C. Becquerel, illustre un nom déjà deux fois célèbre en physique, en annonçant la découverte du premier élément radioactif, l'uranium.

Cette découverte mémorable, qui devait, quelques années plus tard, projeter sur la constitution intime de la matière un faisceau lumineux si pénétrant, tout en dotant la thérapeutique moderne de moyens nouveaux si puissants, ne rayonna pas à l'époque au delà des cercles scientifiques. Mais elle suscita dans ces derniers une vive curiosité et une activité nouvelle.

C'est alors que, pour la première fois peut-être dans l'histoire des sciences, un nom de femme apparaît en tout premier plan et s'illustre par une série de découvertes retentissantes qui devait faire de lui le pôle de tout un chapitre essentiel des sciences physiques et médicales.

Le 12 avril 1898, dix-huit mois après la découverte d'Henri Becquerel, l'Académie des Sciences entend une communication de Mme Sklodowska Curie. Pénétrons dans la noble enceinte et prêtons l'oreille au milieu du bruit des conversations qui, si l'on en croit la légende, masquent parfois la voix de l'auteur. Elle a cherché, annonce-t-elle (1), si des corps autres que les composés de l'uranium sont susceptibles de rendre l'air conducteur de l'électricité. Son dispositif expérimental était des plus simples un condensateur électrique sur l'un des plateaux duquel elle étendait en poudre fine la substance à l'étude. Une différence de potentiel de 100 volts était établie entre les deux plateaux. Si la substance rendait l'air conducteur, un courant passait dont l'intensité servait de mesure au pouvoir radioactif.

(1) C. R. Ac. des Sciences, t. CXXVI, p. 1101

Parmi de nombreuses substances, un premier métal apparaît nettement plus actif que l'uranium : le thorium, lui aussi très rare. Mais voici surtout qu'un certain minerai d'uranium, la pechblende, extrait des mines de Joachimsthal en Autriche, apparaît beaucoup plus actif que l'uranium même. Ce minerai ne contiendrait-il pas un autre élément d'une activité très supérieure à celle de l'uranium ?

Le 18 juillet 1898, nouvelle communication (1). L'expérience a confirmé cette

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

présomption. En faisant l'analyse chimique de cette pechblende, Mme Curie, en collaboration avec son mari, M. Pierre Curie, a isolé une série de substances de plus en plus actives, et finalement est arrivée à un mélange 400 fois plus actif que l'uranium.

Si l'existence de ce métal (que nous soupçonnons dans ce mélange) se confirme, déclarent les deux savants, nous proposons de l'appeler polonium, du nom du pays d'origine de l'un de nous.

(1) C. R. Ac. des Sciences, t. CXXVII, p. 175.

Enfin, le 28 janvier 1899, l'Académie tient une séance qui devait être historique. M. et Mme Pierre Curie et M. G. Bémont exposent qu'ils ont effectivement isolé le métal polonium. Mais, au courant de leurs travaux...

...nous avons, disent-ils, rencontré une deuxième substance fortement radioactive et entièrement différente de la première par ses propriétés chimiques.

Cette substance, bien que composée en majeure partie d'un métal bien connu, le baryum, qui n'est pas radioactif, se montre 900 fois plus active que l'uranium !

Nous sommes portés à croire, concluent les trois physiciens, que la nouvelle substance radioactive renferme un élément nouveau, dont la radioactivité doit être énorme et auquel nous proposons de donner le nom de radium.



Quelles sont donc les étranges propriétés de cet élément nouveau, le radium, dont la découverte était solennellement fêtée dans le grand amphithéâtre de la Sorbonne, le 26 décembre 1923, jour de son vingt-cinquième anniversaire, et qui valut à son auteur le grand prix Nobel, la grande médaille d'or de l'American College of Radiology et une immense célébrité ?

Entrouvrons la porte du laboratoire de M^{me} Curie. Dans un cabinet obscur, une douce lueur verte illumine le centre de la table ; cette lueur s'échappe d'une légère plaque d'aluminium recouverte d'une mince couche d'une substance fluorescente. Soulevons la petite plaque, la lueur s'éteint ; remettons-la en place, la lueur reparaît. Quelque chose situé sous la plaque en provoque donc la fluorescence ; effectivement, il y a là un petit fragment de roche contenant une quantité pratiquement impondérable de radium. Revenons un mois, dix ans, cinquante ans après ; la lueur n'a pas diminué, si l'on a pris soin de renouveler la couche fluorescente inerte ; le minéral n'a rien perdu de son activité.

C'est un fragment de pechblende provenant des mines de Joachimstahl. Depuis combien de millions d'années ou de siècles peut-être le petit morceau de pechblende reposait-il dans le sein de la couche géologique où il est né et

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

produisait-il, sans que nous le sachions, cette énergie radiante émise par la fraction de milligramme de radium, de polonium, d'uranium, qu'il contient ?

Cette énergie, Pierre Curie l'a mesurée en 1903 : un gramme de radium dégage 130 calories par heure.

Voici un échantillon de 32^{mg} de bromure de radium que je possède depuis neuf ans, nous dit M. Frederick Soddy, professeur à l'Université d'Oxford, qui, avec d'autres maîtres de l'école anglaise, a illustré son nom dans l'étude du radium (1). Un calcul simple montre que, pendant ce temps, environ 200.000 calories ont été créées.... Un poids de charbon égal au poids de ce bromure de radium fournirait, en brûlant complètement, environ 250 calories seulement; de sorte que ce radium a produit, en neuf ans, 800 fois l'énergie que l'on peut tirer du même poids de charbon... Et ce radium est aussi actif que jamais...

Dans le sein de la terre où il reposait, quelle somme de calories, c'est-à-dire d'énergie, l'échantillon du professeur Soddy a-t-il pu rayonner depuis l'origine des temps géologiques ? L'imagination s'égaré.

(1) Fr. SODDY. Le Radium. Traduction M. Lepape, chez Alcan, p. 36.

Est-ce tout ? Ce n'est qu'un commencement.

En rayonnant, ces métaux radioactifs se transforment les uns en les autres. Par d'admirables travaux scientifiques poursuivis par Mme Curie et ses élèves, d'une part, le professeur Soddy et l'école anglaise, d'autre part, la généalogie de trois familles, celles de l'uranium, du thorium, de l'actinium, a pu être entièrement reconstituée.

I

L'uranium I engendre l'uranium X.

L'uranium X engendre l'uranium II.

L'uranium II engendre l'ionium.

L'ionium engendre le radium.

Le radium engendre l'émanation ou radon, gaz étrange au rayonnement sans pareil.

L'émanation engendre le radium A, puis B, puis C, puis D, puis E.

Le radium E engendre le polonium. Le polonium engendre le radium G.

Et ce radium G, dernier stade actuellement connu de désintégration, paraît bien être le plomb.

Continuons à parcourir à grands pas ce domaine étrange sous la conduite d'un de ses principaux explorateurs, Fr. Soddy.

Les chercheurs de la radioactivité s'attachèrent à observer les variations que présente la radiation de certains éléments. Ils aperçurent que la vitesse avec laquelle un élément radioactif évolue à un instant donné est toujours une fraction constante de la masse de la substance qui se transforme à cet instant. Cette constante radioactive de chaque élément leur suggéra l'idée qu'ils avaient affaire à une loi statistique.

Nous avons déjà rencontré sur notre route ce type de loi général en physique, qui

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

n'est que l'intégrale perceptible à nos sens de phénomènes élémentaires infiniment nombreux et soumis au hasard. Sous le phénomène apparemment lent et graduel, ils aperçurent la foule des atomes qu'un arrêt inflexible décime au hasard à chaque instant. Chacun de ces petits êtres, né lui-même d'un ancêtre plus lourd, vit dans l'attente de se désintégrer d'un instant à l'autre en produisant un atome plus léger et l'émission instantanée d'un rayonnement.

Ces physiciens eurent l'idée de concrétiser la constante radioactive de chaque élément par la notion de vie moyenne des atomes de cet élément, c'est-à-dire du temps moyen pendant lequel ces atomes vivent avant d'exploser, temps qui s'exprime mathématiquement par l'inverse de la constante radioactive.

Cette vie moyenne leur apparut varier d'une façon déconcertante d'un élément à l'autre. C'est ainsi que l'atome de l'uranium I, le grand ancêtre de la dynastie, a une vie moyenne de huit milliards d'années ; mais son descendant direct, l'atome d'uranium X, ne vit en moyenne que 35 jours et demi, et l'atome de radium, 2440 ans. En voici un, le radium C, dont la vie n'excède pas en moyenne un millionième de seconde !

Au sein de la matière radioactive, il nous semble voir les atomes exploser, comme il y a quinze ans, sur le front, les éclatements des obus ponctuèrent la nuit d'éclats fugitifs.



Mais ne nous attardons pas à cueillir ces fleurs étranges. Dans la chasse que nous poursuivons au secret intime de la matière, nous ne voulons retenir des découvertes sensationnelles auxquelles nous venons d'assister que le faisceau de lumière qu'elles projettent sur notre route.

Si vraiment, certains atomes, dits radioactifs, sont doués de l'étonnante propriété d'exploser à un certain instant de leur existence pour se décomposer en un atome plus léger et quelque chose que nous appelons un rayonnement, c'est, à n'en pas douter, que ces atomes sont complexes.

Et si les atomes radioactifs sont complexes, qui nous permet d'affirmer que les autres, ceux d'oxygène, de carbone, d'azote, etc., ne le sont pas aussi ?

Incontestablement vraie suivant les conceptions de la chimie classique, l'étymologie a-tomos insécable, mentirait-elle physiquement, et serions-nous donc autorisés à parler de l'anatomie de l'atome ?



BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

De l'étape où nous a conduits notre déjà longue ascension et où nous pensions nous reposer comme au terme de notre ultime effort, voici donc que les premières lueurs de cette nouvelle journée font apparaître à nos yeux les lignes à peine distinctes et singulièrement vertigineuses d'un nouveau sommet qui nous domine et qu'il va falloir conquérir à son tour.

L'impression nous vient tout d'un coup de nous trouver à cet épaulement de la Dent-du-Midi que les guides de Salvan appellent le col des Paresseux. Les lignes d'Emile Javelle, dans ses Souvenirs d'un Alpiniste, nous reviennent cruellement à la mémoire :

De ce col, ... on voit se dresser la dernière pente de la Dent-du-Midi, longue encore, bien longue pour des jarrets tremblants de fatigue et des poumons épuisés ; et rapide ! Le paresseux lève la tête, mesure la distance d'un regard découragé, laisse échapper son bâton, son sac, puis se couche et déclare net qu'il n'ira pas plus loin.

Non, nous ne nous arrêterons pas au col des Paresseux ! Mais avant de nous encorder pour une nouvelle et dure étape, jetons un regard sur les flancs de la montagne que nous allons attaquer.

Tout en bas, sous la froide lumière de l'Hellade antique, Anaxagore, un de ces cerveaux lucides d'il y a 2500 ans que Tannery a fait revivre, nous fait signe du doigt que la route sera encore longue, et sa voix nous parvient en un écho lointain :

Par rapport au petit, il n'y a pas de minimum ; mais il y a toujours un plus petit, car il n'est pas possible que l'être soit anéanti par la division (1)...

(1) TANNERY, Pour l'Histoire de la Science hellène, Gauthier-Villars, p. 312.

Remontons des yeux la pente. Des indices nombreux et déjà anciens ne nous montrent-ils pas que l'atome ne peut pas être physiquement ce grain compact, homogène, insécable et impénétrable de matière qu'une interprétation simpliste de la conception de Dalton peut laisser concevoir ?

Reportons-nous aux rudiments de chimie que nous avons appris sur les bancs de l'école avec plus ou moins d'enthousiasme.

Les noms des corps simples remontent à notre mémoire par familles, comme en botanique, et chaque famille nous apparaît avec ses propriétés nettement caractérisées. Telle, en particulier, cette propriété fondamentale de la valence que M. Jean Perrin se représente d'une façon si expressive comme des mains que chaque atome tendrait pour serrer d'autres mains que lui tendent d'autres atomes en vue de constituer avec ceux-ci des édifices moléculaires. Les membres de la première famille, monovalents, tendent une main ; ceux de la deuxième famille, divalents, deux mains, et ainsi de suite jusqu'à quatre mains et même plus.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Voici des relations de famille qui s'expliquent mal sans consanguinité ! Dans le domaine matériel, notre esprit répugne d'ailleurs à admettre l'existence d'une pléiade de substances premières distinctes, à propriétés intrinsèques toutes faites, se groupant en familles harmonieuses et douées entre elles d'affinités précises, sans que cette harmonie, ces affinités soient dues à un agencement, lui-même harmonieux, d'éléments internes complexes.

Certaines relations numériques parlent d'elles-mêmes. Il suffit, par exemple, de fixer un instant notre attention sur la liste des poids atomiques des principaux éléments pour constater qu'ils s'expriment presque tous par des nombres entiers, tous multiples, à moins de 1 % près, du plus petit d'entre eux, l'hydrogène. Dès 1815, un chimiste anglais, W. Prout, dans un mémoire anonyme resté complètement inaperçu de ses contemporains, avait tiré hardiment de cette remarque la conclusion que les atomes de tous les éléments étaient constitués par l'union, insécable pour nous, de protoatomes d'une seule sorte qui seraient peut-être des atomes d'hydrogène, peut-être même des atomes d'un élément deux fois ou quatre fois plus léger.

Mais il y a plus. Continuons à retourner ces nombres comme cet Américain que Georges Duhamel voit mâchant des chiffres dans le fond de son auto tandis que sa femme conduit. Donnons-nous simplement la peine de ranger les poids atomiques des éléments dans l'ordre croissant.

Un physicien russe du siècle dernier, Mendeleïeff, s'est livré attentivement à ce classement et il a vu apparaître dans la série des éléments ainsi classés une périodicité de propriétés physiques et chimiques qui se retrouvait, tous les huit éléments. Cette périodicité n'allait pas, il est vrai, sans quelques anicroches, de sorte que l'idée de Mendeleïeff, publiée à Berlin en 1869, puis à Moscou en 1870, se heurta pendant de longues années à une défaveur manifeste.

Il y a dans les sciences, comme dans les arts, comme en tout, des esprits qui se portent d'instinct sur ce qui dépare, ce qui oppose, ce qui divise. Ces esprits eurent tôt fait de mettre en évidence les anomalies de la classification de Mendeleïeff et de la rejeter dans le grenier aux rêveries.

Fort heureusement pour l'avancement des sciences, tous les savants ne sont pas aussi positifs, et des Termier rayonnent un peu partout leur foi enthousiaste.

Des esprits sérieux, nous dit M. Marcel Courtines (1), l'un de ces enthousiastes, furent au contraire séduits par l'harmonie qui s'en dégage (de cette classification). Il leur était facile de trouver de nombreux exemples de théories assises dont les débuts furent embarrassés. Leurs tendances les portaient à chercher les raisons des irrégularités, plutôt qu'à se défaire d'un procédé de classement dont la beauté propre les frappait. Il n'est pas possible, disent-ils, qu'une pareille propriété ne traduise pas un fait, qui nous échappe encore, mais que l'avenir dégagera. Leur succès est une réponse victorieuse au groupe d'esprits trop positifs qui veulent tuer la foi scientifique. La découverte ne va pas sans une idée préconçue. Nous avons besoin d'un phare pour nous guider parmi les ténèbres où nous nous mouvons.

(1) Marcel COURTINES, Où en est la Physique ? Gauthier-Villars, p. 77.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Le fait dont ces physiciens avaient l'intuition et que l'avenir devait magnifiquement dégager, c'est un agencement périodique intérieur de l'atome correspondant à la périodicité de ses propriétés extérieures.

L'intuition faisait donc pressentir depuis longtemps la complexité de l'atome. Mais, avant la découverte des phénomènes radioactifs, n'avait-on jamais rien vu réellement sortir de l'atome ?



1855. Le physicien allemand Geissler s'applique à faire éclater l'étincelle électrique dans un tube de verre où il a réalisé le vide. Un jour qu'il a poussé le vide plus avant, il voit l'étincelle se transformer dans le tube en une nébulosité féerique.

Poussons le vide toujours plus loin avec les physiciens du siècle dernier qui se sont attachés à l'observation de ce phénomène. La nébulosité se transforme en s'irisant de douces lueurs d'aurore boréale et s'interrompt progressivement de mystérieux espaces obscurs, auxquels ont été donnés les noms des chercheurs, Faraday, Crookes, Hittorf, qui, les premiers, les ont aperçus ; telles ces terres polaires aux contours indécis auxquelles la carte donne le nom des premiers navigateurs qui les ont reconnues.

Arrivons aux grands vides que permet la technique moderne des laboratoires. Brusquement, un fait nouveau : l'illumination intérieure s'efface ; à sa place, une vive luminescence verte, ou jaune, ou rose s'étend sur les parois du tube qui semble avoir durci. Quelles réalités se cachent sous ces apparences nouvelles ?

A l'intérieur, plaçons une petite croix métallique en face de la cathode (cata odos) ou pôle négatif supérieur, et relierons cette petite croix à l'anticathode opposée. Voici l'ombre de la croix qui se projette sur le fond du tube ! Avec Hittorf, qui, le premier, vit cette ombre en 1869, nous devons conclure que la luminescence du verre est due à quelque chose qui s'échappe en ligne droite de la cathode, à des rayons cathodiques, comme les appelle Crookes. Mais de quelle nature ?

Sur leur trajet, plaçons un petit moulinet ; il se met à tourner. Ce sont donc des projectiles. En 1879, sir Williams Crookes croit voir dans ces projectiles les molécules du gaz que leur énorme raréfaction a libérées de leurs attractions mutuelles et qui n'obéissent plus qu'aux répulsions et attractions électriques des électrodes.

Hypothèse mort-née ; car, en 1892, Hertz réussit à faire diffuser les rayons cathodiques au travers de minces plaques d'aluminium. Deux ans plus tard, notre compatriote Ph. Liénard parvient même à les faire sortir du tube à vide, en pratiquant dans la paroi de verre une fenêtre qu'il ferme au moyen d'une mince plaque d'aluminium. Aucune molécule ne parviendrait à traverser la foule serrée

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

et innombrable de ses congénères qui constitue une plaque métallique, si mince soit-elle.

Ces étranges corpuscules seraient-ils porteurs de charges électriques ? A l'extrémité du tube, recevons-les, comme fit M. J. Perrin en 1895, dans une sorte de petit seau dirigé vers la cathode et relié à un électromètre. Celui-ci se charge négativement : les projectiles cathodiques sont donc porteurs de charges négatives.

Allons-nous avoir la surprise de les voir ?

Pénétrons dans un laboratoire que nous connaissons bien, le Cavendish Laboratory de Cambridge, où nous avons déjà vu travailler sir J.J. Thomson et ses élèves. Le maître a réussi à faire pénétrer les rayons cathodiques par un petit orifice dans une cloche à l'intérieur de laquelle il a disposé, dans le plan du bombardement, une lame de verre quadrillée enduite d'une substance fluorescente. La délicate et élégante expérience réussit : ces raies lumineuses rectilignes apparaissent sur la plaque fluorescente, matérialisant à nos yeux le passage des corpuscules.

Ce n'est pas tout. Sir Thomson a disposé un électroaimant au moyen duquel il peut faire agir un champ magnétique d'intensité connue, normalement au faisceau des trajectoires : voici les trajectoires qui s'incurvent en cercle. Le quadrillage de la plaque permet au savant de déterminer le rayon de ces cercles. Il en déduit par le calcul la vitesse des projectiles, ainsi que le rapport de leur charge électrique à leur masse.

Thomson répète un grand nombre de fois l'expérience avec des gaz raréfiés et des électrodes de nature différente : résultats identiques.

La conclusion s'impose : les projectiles cathodiques sont des éléments électrisés, arrachés à la matière, et possédant tous les mêmes propriétés, quelle que soit la matière dont ils sortent.

D'autre part, quelles que soient la durée et la répétition des émissions, le vide se maintient intact dans le tube.

Le tube restant vide de matière, c'est donc que les corpuscules cathodiques sont immatériels. Ces petits obus seraient donc de l'électricité pure sans support matériel, de véritables grains d'électricité.

Mais des grains de cette sorte ne nous sont pas inconnus ; ce sont ces électrons, que nous avons vu le physicien américain Millikan déceler, isoler, compter et peser devant nous !

Les belles expériences de sir J.-J. Thomson vont même nous apprendre quelque chose de nouveau et de très important sur ces étranges petits individus si éloignés, en apparence, des objets familiers au milieu desquels nous vivons, et cependant si proches en réalité.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Nous venons de voir que l'action d'un champ magnétique sur les corpuscules cathodiques a permis au maître de Cambridge de déterminer le rapport entre la charge électrique de ces corpuscules et leur masse. Cette charge, nous la connaissons, c'est celle que Millikan a calculée devant nous.

Faisons donc la simple division qui va nous donner la masse de l'électron. Nous trouvons un nombre 1848 fois plus petit que la masse de l'atome d'hydrogène, elle-même la plus petite que nous connaissions ! Et cette masse nouvelle n'est pas constante ; nos calculs nous indiquent qu'elle doit croître avec la vitesse des corpuscules, et cela bien avant que cette vitesse approche de celle de la lumière, ce qui exclut toute interprétation relativiste, comme nous essayerons peut-être un jour de nous en rendre compte.

Ce résultat capital est une confirmation formelle que nous n'avons pas affaire à une masse matérielle, mais simplement à une inertie d'origine purement électromagnétique et dont la petitesse est sans commune mesure avec les masses matérielles que nous connaissons.

A la vérité, la physique moderne paraît bien avoir atteint dans l'électron un élément réellement immatériel au sens où nous nous représentons familièrement la matière et dont l'exiguïté affolerait notre imagination plus que la distance de Vega, si nous pouvions nous la représenter !

Et voici cependant qu'en 1914 un physicien viennois, Ehrenhaft, et deux de ses élèves, F. Zerner et D. Konstantinowsky, ont prétendu avoir démontré l'existence d'un sous-électron. Les conclusions opposées auxquelles arrive Millikan, quelque formelles qu'elles soient, ne permettent cependant pas, comme le reconnaît lui-même le grand physicien américain, de formuler une assertion dogmatique contraire (1).

(1) MILLIKAN, L'Elektron, p. 210 et suiv.

En un écho lointain, la voix d'Anaxagore nous parvient à nouveau des grands fonds de l'histoire des sciences : « Par rapport au petit, il n'y a pas de minimum... » !

Quelle certitude philosophique que nous puissions avoir que l'infiniment petit, au sens mathématique du mot, ne peut exister dans l'Univers matériel, pas plus que l'infiniment grand, nous restons profondément troublés. Au fond de quel gouffre faudra-t-il vraiment descendre pour trouver le plancher réel des dimensions physiques ?



Mais n'y a-t-il pas dans les rayons cathodiques un phénomène exceptionnel, étranger au jeu normal des lois de la nature ? Torturée dans le tube de Crookes

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

comme sur le banc de la question, la nature n'a-t-elle pas proféré un cri de douleur plutôt qu'un aveu ? Or, l'anormal ne nous intéresse pas. Ce que nous cherchons, c'est le secret des objets familiers qui nous entourent.

Prolongeons donc notre regard sur la montagne pour voir si nous n'apercevons pas quelque phénomène familier qui nous apporte une confirmation des faits vraiment trop spéciaux que nous venons d'observer.

Voici là-bas un feu d'herbe sur l'alpage que nous dominons. En 1733, le physicien français du Fay observa que les flammes, et généralement les corps incandescents, émettent de l'électricité. Cette obscure prophétie devait rester incomprise pendant un siècle et demi, malgré les travaux d'Edmond Becquerel en France en 1853, de Guthrie en Angleterre en 1873, d'Elster et Geitel en Allemagne en 1882 et 1889.

Avec son extraordinaire génie inventif, Edison, mort en 1931, laissant au monde un nombre incalculable d'inventions pratiques, l'utilise en 1884 pour construire la première lampe à deux électrodes. Mais il faut attendre la dernière année du siècle écoulé pour que le phénomène dévoile son secret. Sir J.-J. Thomson applique à l'étude du rayonnement des corps incandescents les mêmes méthodes qu'aux rayons cathodiques et déclare en 1899 que ce rayonnement n'est aussi qu'une émission d'électrons. Les travaux ultérieurs de Langmuir et de Richardson sur l'émission thermoélectrique confirment pleinement son assertion.

Des flots d'électrons s'échappent donc de ces flammes, comme des filaments de nos lampes.

Après l'effet de la température, celui de la lumière. Vers 1860, Edmond Becquerel observe que, si l'on relie par un fil deux plaques recouvertes de chlorure d'argent et que l'on éclaire l'une d'elles, un courant passe de l'une à l'autre. En 1887, Hertz observe à son tour que des étincelles jaillissent plus facilement entre les deux tiges d'un éclateur lorsque ces tiges sont éclairées par des rayons ultraviolets. Étudiée méthodiquement, notamment par Millikan, cette émission photoélectrique a encore trouvé son explication dans une expulsion d'électrons par les atomes soumis à certaines radiations lumineuses.



Nous ne pouvons plus douter maintenant que les atomes, organismes complexes, contiennent à profusion de ces électrons tels que nous en avons vu sortir dans le tube de Crookes. Nous venons même de voir que ces petits êtres sortent de leur prison bénigne avec une étonnante facilité et sous de multiples influences : tension électrique, température, lumière.

Millikan nous les a montrés en rupture de ban, formant par leur flot innombrable à travers la matière conductrice ces courants électriques qui font briller nos

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

lampes et subviennent si facilement à tous les besoins de notre vie moderne, puis regagnant docilement leur cellule ou toute autre dès que l'excitation qui les a fait sortir a pris fin.

Avant de prendre provisoirement congé de ces petits impondérables, force nous est d'enregistrer loyalement, sportivement, la leçon d'humilité intellectuelle qu'ils se sont plu à nous donner en se dévoilant à nous.

Depuis l'an 1799 à la fin duquel Volta créa le premier « électromoteur » (la pile voltaïque), jusqu'à l'année 1909 en laquelle Millikan découvrit le grain d'électricité, aucun homme de science ou d'industrie, aucune personne s'occupant de près ou de loin d'électricité n'avait jamais douté que le courant électrique, dont l'illustre professeur de Pavie avait doté l'humanité, ne circulât du pôle positif d'un électromoteur quelconque vers le pôle négatif. Or, il nous paraît maintenant impossible de douter que les électrons, dont la course folle semble constituer le courant électrique, circulent précisément en sens inverse.

Mais là ne s'arrêtent pas les notions fondamentales que ce petit diable d'électron nous forcera peut-être à abandonner un jour.

Depuis qu'en 1733 le physicien français du Fay fut amené à distinguer deux espèces d'électricité qu'il appela « vitrée » et « résineuse », espèces que Franklin consacra en 1747 sous le nom d'électricités positive et négative, l'enseignement officiel a toujours admis cette dualité.

Or, si les manifestations de l'électron négatif sont aussi nombreuses qu'éclatantes, aucune observation, aucune expérience n'a encore permis de mettre en évidence l'existence d'un grain d'électricité positive. Les rayons positifs observés par Goldstein en 1886, puis étudiés par J.-J. Thomson et Aston, apparaissent en effet comme constitués par des molécules auxquelles la privation d'un ou plusieurs électrons confère par différence une charge électrique positive.

De sérieuses raisons, scientifiques autant que philosophiques, portent en conséquence certains physiciens qui ont foi dans l'unité de l'univers matériel, à croire à l'unité de l'électricité, la seule électricité réelle étant celle que, jusqu'à ce jour, nous avons appelée négative et qui se manifeste d'une façon éclatante sous la forme de l'électron. Dans cette conception hardie, il n'y aurait pas plus de différence entre les électricités négatives et positives qu'entre le chaud et le froid, et nous parlerions de charges positives uniquement comme les techniciens du froid parlent de frigories, ou bien encore comme les mathématiciens parlent de nombres négatifs.

Quel beau champ d'action pour les chercheurs de demain, pour les jeunes qui se laisseront toucher par la « Vocation de Savant » et qui voudront continuer à inscrire des noms français sur le livre d'or international des sciences !



BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

La voie ainsi bien déblayée vers l'atome, il nous faut maintenant, pour pénétrer dans la citadelle, revenir au radium.

Entr'ouvrons donc à nouveau la porte du laboratoire Curie.

Sur la table, un bloc de plomb, et dans sa face supérieure une rainure étroite et profonde au fond de laquelle a été déposée une parcelle de substance radioactive. Des rayons mystérieux s'échappent, nous le savons, de ce grain de matière. Ne nous sera-t-il pas possible de les voir, comme nous avons déjà vu les rayons cathodiques ?

En travers de la rainure, posons donc verticalement une plaque de verre enduite d'une substance fluorescente : une gerbe lumineuse apparaît immédiatement sur le verre, pointant vers le plafond.

Ces rayons seraient-ils, comme les rayons cathodiques, déviés par un champ magnétique ? Insérons la plaque de verre entre les deux pôles d'un fort électro-aimant : effectivement, la gerbe lumineuse réagit, mais en prenant un aspect bien particulier. Au lieu d'un faisceau, en voici trois nettement séparés.

L'un des faisceaux s'étale en s'incurvant fortement vers la gauche, rappelant tout à fait les rayons cathodiques.

Le deuxième, très délié, continue à pointer droit vers le haut.

Le troisième, également très fin, s'est légèrement infléchi vers la droite, comme s'il était chargé d'électricité contraire à celle des rayons cathodiques.

Continuons notre investigation en observant l'absorption de ces rayons par la matière. Sur la rainure, plaçons un mince feuillet d'aluminium de six centièmes de millimètre d'épaisseur : un fuseau disparaît, celui qui était dévié vers la droite.

Remplaçons notre feuillet par une plaquette du même métal, épaisse de 5^{mm} : à leur tour, disparaissent les rayons déviés vers la gauche ; le fuseau vertical reste toujours intact.

Couvrons maintenant la rainure avec une plaque d'acier de 10^{cm} d'épaisseur ; accumulons, une à une, douze pièces d'un franc. Le faisceau vertical subsiste. Les dernières traces de ses effets sont encore décelables après la traversée d'un blindage de 30^{cm} de fer ou de 15^{cm} de plomb.

Sir Ernest Rutherford, professeur de physique expérimentale à l'Université de Cambridge, qui, l'un des premiers, avec Henri Becquerel, Guisel et Villard, distingua ces trois groupes et en devina toute l'importance, les dénomma rayons α , rayons β , rayons γ , dans l'ordre de leurs pouvoirs de pénétration croissants.

Trois sortes de radiations réagissant si différemment au champ magnétique et de

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

pénétration si différente ! Nous sentons que nous avons attaqué l'atome radiant par une voie pleine de promesses. Suivons de près nos guides.

Dès les premières années après la découverte du radium, l'identité des rayons \bullet avec les rayons X est établie. Mais les rayons \bullet du radium apparaissent d'une pénétration incomparablement plus grande que les rayons X du tube cathodique.

Très vite également, Pierre et Marie Curie mettent en évidence l'analogie des rayons \bullet avec les rayons cathodiques, en montrant, par une mesure électrique directe, qu'ils transportent des charges électriques négatives. L'identité est établie, quelques années plus tard, par sir J.-J. Thomson, qui applique aux rayons \bullet les mêmes méthodes expérimentales qu'aux corpuscules cathodiques : même rapport entre la charge électrique et la masse ; les corpuscules \bullet sont donc bien des électrons. Par contre, leur vitesse, assez variable, est très supérieure et se rapproche de la vitesse de la lumière, 300.000^{km} à la seconde.

La radioactivité nous apporte donc une preuve de plus que l'électron est un des constituants de l'atome.

Mais ici une difficulté nous arrête. La matière, donc l'atome, à l'état normal, est électriquement neutre. De plus, nous savons depuis les origines de la science électrique que des charges électriques de même signe se repoussent d'autant plus violemment qu'elles sont plus rapprochées. Comment donc des électrons peuvent-ils rester associés dans un espace aussi restreint qu'un atome s'ils ne sont pas retenus enchaînés par un noyau positif central, dont la charge électrique équilibre la somme des charges négatives des électrons ? Et puisque l'électron est immatériel, ne faut-il pas supposer que toute la masse matérielle de l'atome est concentrée dans ce noyau central ?

Nous voici donc conduits par le raisonnement à une première esquisse de l'anatomie de l'atome. Les faits vont-ils venir confirmer notre hypothèse ?



Au coeur de la vieille cité universitaire de Cambridge. Le professeur Rutherford est au travail dans ce laboratoire Cavendish que nous connaissons déjà bien. C'est lui qui, maintenant, en nous guidant dans l'exploration des rayons \bullet , va nous faire pénétrer dans la citadelle atomique.

Nous sommes en 1903. Soumettant les rayons \bullet à cette méthode générale d'attractions magnétiques et électriques que nous venons de voir si bien réussir avec les rayons cathodiques et \bullet , Rutherford parvient à déceler qu'ils sont, eux aussi, formés de particules, s'échappant de l'atome à la vitesse de 15.000 à 20.000^{km} à la seconde.

Mais un résultat autrement important l'attend à l'issue du calcul du rapport

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

entre la charge électrique des particules et leur masse. Le nombre en face duquel se trouve le maître de Cambridge lui apparaît du même ordre que si chaque particule • était bien, cette fois, matérielle et constituée, soit par deux atomes d'hydrogène porteurs d'une seule charge d'électricité positive, soit par un atome d'hélium porteur de deux de ces charges (nous sommes tentés de dire délesté de deux électrons). Uranium, radium, polonium, thorium... quel que soit le métal radioactif que Rutherford scrute, le résultat se retrouve le même !

L'hélium était magnifiquement entré dans l'histoire des sciences en 1869, par la voie des cieux, grâce à un coup d'audace analogue à celui qui, vingt-trois ans plus tôt, avait valu à Le Verrier la découverte de la planète Neptune. Les physiciens anglais Norman Lockyer et Frankland, faisant l'analyse spectrale de la lumière solaire, avaient remarqué dans l'arc-en-ciel développé par le prisme une raie nouvelle ne coïncidant avec aucune de celles fournies par les spectres des éléments alors connus. Ils en avaient hardiment conclu à l'existence dans le soleil d'un élément nouveau qu'ils appelèrent hélium, du nom de sa patrie d'origine.

Vingt-six ans plus tard, leur compatriote, sir William Ramsay, identifiait ce corps nouveau avec un gaz extrêmement léger qu'il trouva dans certains minerais d'uranium. Il remarquait, en outre, que tous les minéraux où il trouvait de l'hélium contenaient aussi de l'uranium ou du thorium. L'explication, Rutherford et Soddy l'avaient donnée en supposant que l'hélium devait être un des produits ultimes de désintégration des éléments radioactifs, s'accumulant au cours des millénaires dans le sein du minéral.

Quel trait de lumière dans l'esprit du grand savant anglais, lorsque ses calculs lui montrent que chaque particule • peut être un atome d'hélium ! Une vérification directe s'impose. Tout d'abord, il s'assure avec son collaborateur Royds que de l'hélium se développe effectivement dans une enceinte scellée contenant du radium ; puis, il tente l'expérience cruciale suivante.

Voici un tube de verre à paroi invraisemblablement mince (un centième de millimètre) qu'il vient de préparer. Il enferme dans ce tube un peu de ce gaz étrange, l'émanation ou radon qu'engendre le radium et qui émet des rayons d'une richesse exceptionnelle. Le verre ne livrera passage à aucun gaz ; mais il doit se laisser traverser, comme un blindage trop mince, par les obus • que le radon projette à 20.000^{km} à la seconde. Si, vraiment, ces obus sont des atomes d'hélium, nous devons peu à peu déceler de l'hélium à l'extérieur du tube. Effectivement !



Laissons sir Ernest à sa joie et franchissons le dernier pas qui va nous conduire à une étape importante.

Un coup d'oeil sur les poids atomiques du radium et du radon qu'il engendre

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

montre que leur différence est juste quatre, et il semble bien en être ainsi, compte tenu des lacunes non encore comblées, à tous les échelons des trois dynasties radioactives. Or, quatre est précisément le poids atomique de l'hélium.

Nous voici donc amenés à conclure que chaque atome radioactif, en explosant, projette à 20.000^{km} par seconde un atome matériel d'hélium délesté de deux électrons ; dans quelques instants, nous dirons un noyau d'hélium.

Dans la salle obscure, mettons l'œil à cette loupe que sir William Crookes a imaginée sous le nom de spinthariscopes. La lentille est mise au point sur un écran fluorescent en avant duquel est fixée une aiguille. La pointe de cette aiguille a touché une petite fiole ayant contenu du radium. Nous n'apercevons d'abord qu'une plage lumineuse ; mais, peu à peu, notre œil se fait à l'obscurité et la plage se résout, comme une nébuleuse, en une myriade de scintillations ce sont les points d'impact des particules • projetées par la pointe d'aiguille contre l'écran. Nous voyons réellement des atomes !

Ces projectiles atomiques, Rutherford et son collaborateur, le docteur Geiger, sont parvenus, par des dispositifs expérimentaux d'une extrême délicatesse, à les compter. 136 millions d'atomes d'hélium sont, pendant chaque seconde, expulsés par un milligramme de radium.

Dans quelle tourelle de cuirassé allons-nous pénétrer ? Objets placides et familiers qui nous entourent, parmi lesquels nous aimons tant, le soir, trouver paix, silence et repos, n'êtes-vous donc qu'une effroyable batterie de canons chargés que la main de la Providence empêche seule de nous pulvériser en un instant !



Le sommet ne saurait plus être bien loin maintenant. Serrons de près notre guide sur la piste si fructueuse des rayons •.

Serons-nous assez heureux pour isoler l'un d'eux et voir sa trajectoire ?

Un physicien anglais, C. T. R. Wilson, en a indiqué le moyen en 1912. Ainsi que M. Jean Perrin l'avait observé en 1896 pour les rayons X, il remarqua que les projectiles • laissent dans l'air un sillage d'ions sur lesquels se condense un chapelet de gouttelettes d'eau, si l'atmosphère est sursaturée d'humidité d'où un procédé simple pour voir et photographier le sillage des particules •.

Observons avec Rutherford la série de beaux clichés qu'il a ainsi obtenus et que nous trouvons reproduits dans son ouvrage *Radiations from Radioactive Substances*, sorti en 1930 des presses de l'Université de Cambridge. Voici une gerbe de sillages de particules • émises par une parcelle de thorium. Les sillages, longs de 6 à 7^{cm}, sont rectilignes, montrant que les noyaux matériels d'hélium

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

vont droit devant eux sans s'inquiéter d'aucun obstacle. Sur la fin du parcours seulement, des coudes brusques comme si, à bout de souffle, le moindre obstacle les avait arrêtés.

Voici maintenant deux superbes clichés où a été saisi le parcours isolé d'une particule •. Même parcours rectiligne avec, au bout, une petite cassure, comme une baguette dont on aurait brisé l'extrême pointe qui pend. Sur un des clichés, une deuxième cassure moins franche apparaît avant le crochet extrême.

C'est donc bien seulement à bout de force vive que le projectile s'est laissé dévier par un obstacle. Tous les autres obstacles, il les a « bus »; il les a traversés sans s'inquiéter d'eux. Or, ces obstacles, les atomes de l'air, se sont pressés sur sa route par milliards de milliards.

Incontestablement, l'atome d'hélium lancé à 20.000^{km} à la seconde traverse les autres atomes.

Mais, pour expliquer cette libre traversée d'atomes de matière par un atome de matière, nous sommes forcés de supposer que l'atome présente des vides, et même des vides immenses, par rapport à ses dimensions. L'énorme vitesse du noyau positif d'hélium l'empêche de subir au passage la répulsion des noyaux positifs des atomes qu'il traverse. Cependant, à bout de vitesse, la répulsion devient sensible, et il suffit à ce moment qu'il passe assez près d'un noyau pour qu'il soit dévié par lui, d'où les crochets extrêmes que présentent les sillages.

Cette roche si dure que nous piétinons serait aussi vide que les espaces interplanétaires ! Nous reculons devant une assertion si contraire aux apparences. Pourquoi ne pas supposer que le noyau d'hélium traverse l'air tout droit comme une balle de fusil, en écartant tout bonnement les atomes sur son parcours au lieu de les traverser ?

Forçons donc une gerbe de particules • à traverser, non plus un gaz, mais une feuille d'aluminium épaisse d'un centième de millimètre. La gerbe traverse tout droit, sans déviation aucune, sauf une très légère dispersion. Nous sommes bien obligés, cette fois, de reconnaître que les atomes métalliques se sont laissés traverser tout droit comme des paniers percés. Toutefois, quelques particules • ont été déviées. Quelques-unes même, environ une sur dix mille, ont été renvoyées vers l'arrière ; venues heurter de face des atomes, elles ont rebondi comme des balles sous le choc de la répulsion électrique des électricités, du même nom.

Avec sir Ernest Rutherford, nous sommes donc vraiment amenés à conclure que chaque atome est constitué par une charge d'électricité positive concentrée en un noyau matériel central, ce noyau étant entouré, à très grande distance, par une couronne d'électrons immatériels dont la somme des charges négatives neutralise la charge positive du noyau.

Enfin, pour expliquer que les électrons négatifs ne subissent pas l'attraction du noyau positif central, il faut admettre qu'ils tournent autour de ce noyau avec une vitesse suffisante pour que leur force centrifuge équilibre l'attraction du noyau,

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

exactement de la même manière que la force centrifuge de notre Terre et des autres planètes les empêche de tomber sur le Soleil.



L'atome, système planétaire ! Au lieu de l'anatomie de l'atome, est-ce donc l'astronomie de l'atome que nous devons inscrire en tête de cette étude ?

Sommes-nous dans un laboratoire de physique ou dans un observatoire ? Est-ce un physicien ou un astronome que nous voyons l'œil à cette lunette astronomique microscopique faite pour un monde stellaire infiniment petit ?

Dans le champ de cet instrument d'optique, ce physicien compte les scintillations qui lui apparaissent sur un écran fluorescent ; ce sont les points d'impact de particules • projetées par un grain de radium et qui, en traversant une mince feuille d'or, ont été déviées d'un certain angle.

Pourquoi donc Rutherford a-t-il prié ses collaborateurs Marsden et Geiger de se livrer à ce minutieux pointage ? Concentrons notre attention et assurons bien nos pas pour suivre notre guide dans le passage difficile qu'il va nous faire franchir !

Le maître suit par la pensée les particules atomiques d'hélium à leur passage à travers cette foule d'atomes d'or que le célèbre nombre d'Avogadro, bien connu de nous, lui permet de recenser. Il se dit que chacune des particules comptées par ses collaborateurs a été déviée de l'angle observé, parce qu'elle est passée à une distance bien déterminée du noyau positif d'un atome d'or qui l'a repoussée au passage.

La force répulsive subie par cette particule, il la connaît par sa masse, sa vitesse et l'angle de déviation qu'elle a subie. Appliquons donc à cette force la loi des attractions et répulsions électriques découverte par notre compatriote Ch.-Aug. de Coulomb en 1785.

La charge d'un des pôles de répulsion, nous l'avons, c'est celle de la particule atomique d'hélium. La distance entre les deux pôles, Rutherford la calcule aisément, car elle est liée par la loi des grands nombres, d'une part, au nombre des particules déviées comptées par ses collaborateurs et, d'autre part, aux foules des atomes d'or de la feuille dont il a le recensement : simple calcul des probabilités.

Dès lors, une opération arithmétique va lui donner la charge électrique de l'autre pôle de répulsion : résultat capital, car ce sera la charge électrique du noyau de l'atome d'or.

Nous commençons à voir où nous allons. La même méthode Rutherford l'applique à un grand nombre d'autres éléments, en soumettant au bombardement de

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

particules • de très minces feuilles de ces éléments.

Et voici qu'en rassemblant les résultats, le maître voit apparaître une loi d'une étonnante simplicité : le nombre des charges positives libres portées par les noyaux des atomes de ces différents éléments est à peu près égal à la moitié du poids atomique de ces éléments.

Encore un pas. L'atome étant électriquement neutre, il faut de toute nécessité que ces charges positives soient neutralisées par autant de charges négatives, autant d'électrons, gravitant autour du noyau. Double conquête !

Dès lors, ne pouvons-nous pas conclure que le nombre des planètes électroniques qui gravitent autour du noyau d'un atome est à peu près égal à la moitié du poids atomique de cet élément ? Nous verrons bientôt que ce nombre, le nombre atomique, comme l'a appelé Rutherford, s'est imposé aux physiciens comme la caractéristique essentielle de chaque élément, de préférence au poids atomique lui-même.

Mais Rutherford nous entraîne plus loin encore. Ce soleil gonflé d'énergie qui constitue le noyau de l'atome, les expériences précédentes lui permettent d'en estimer le diamètre. Pour l'or, un des atomes les plus lourds, il trouve 10^{-12} centimètre ; pour l'hydrogène, l'un des plus légers, 10^{-13} centimètre. Après, un premier zéro, puis une virgule, alignons douze autres zéros et finalement le chiffre un, nous aurons la fraction de centimètre qui représente approximativement le diamètre d'un noyau atomique.

Dans ce noyau, concentrons, toutes proportions gardées, une énergie comparable à celle du Soleil. Puis, concevons autour de cet astre un vide de 10.000 à 100.000 fois plus grand, et, dans ce vide, des électrons dont les dimensions sont à celles de l'atome comme les dimensions de notre Terre sont à celles du système solaire, ces électrons gravitant autour du noyau en nombre que nous connaissons.

Le jour où se précisa dans son esprit la vision de ce monde planétaire infiniment petit, le fanion de sir Ernest dut frissonner sous les voûtes de Westminster !



Nous nous arrêtons, saisis par la grandiose unité du spectacle qui s'offre à nous. La loi de la gravitation universelle de Newton, qui régit les attractions des astres comme la chute des corps, n'est-elle pas exactement de la même forme mathématique que la loi des attractions et répulsions électriques de Coulomb qui régit les systèmes atomiques ?

Les physiciens découvriront-ils un jour l'identité mécanique complète des deux infinis entre lesquels le Créateur nous a placés ?

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Des profondeurs de la Grèce antique, les voix de Démocrite et d'Anaxagore ne nous parviennent plus qu'infiniment atténuées, et nous paraissions bien désormais hors de la vision intuitive des philosophes anciens, si prodigieuse fût-elle.

Au-dessous de nous s'étend le domaine de l'accessible par l'observation directe. Nous l'avons quitté depuis longtemps pour pénétrer dans l'accessible par l'intelligence guidée par l'observation indirecte. Au-dessus de nous, les points d'appui de l'observation vont s'espacant et se réduisant à des « prises » de plus en plus menues et difficiles. Nous devons les saisir, au passage, d'une main sûre et faire de grands bonds au-dessus du vide de l'une à l'autre, guidés par notre imagination qui, seule, peut maintenant nous indiquer la voie vers le sommet.

Pour le moment, c'est au cœur du noyau de l'atome qu'il nous faut pénétrer.



Ne connaissons-nous déjà rien de ce réduit ? Ces charges électriques positives que nous venons d'y voir concentrées, comment pourraient-elles rester seules réunies dans un si petit espace sans un lien pour lutter contre les forces qui font se repousser entre elles ces électricités de même signe ?

Il faut donc, nous dit M. Olmer, professeur à l'Institut catholique de Paris, qu'elles soient cimentées, pour ainsi dire, par des électrons négatifs dont les attractions retiendront les corpuscules positifs (1).

(1) L.-J. OLMER, le Radium et la Radioactivité (La Science moderne, n° 7, 1927).

N'avons-nous aucune observation à l'appui de cette déduction ? Ces électrons que nous avons vus jaillir des atomes radioactifs sous la forme des rayons β , accompagnant les rayons α , n'étaient-ils pas, au moins en partie, arrachés avec ces derniers aux noyaux atomiques, au moment de leur explosion ?

Au cœur de l'atome, le noyau paraît donc bien constituer lui-même une citadelle complexe formée de corpuscules matériels chargés d'électricité positive, associés à des électrons nucléaires, comme les a appelés Soddy, par opposition avec les électrons périphériques.

Nous ne voyons qu'un seul noyau atomique qui pourrait ne pas contenir d'électrons, c'est celui qui ne contiendrait qu'une seule charge électrique positive. Ne serait-ce pas précisément le cas du plus simple, du plus léger des éléments que nous connaissions, ce subtil gaz hydrogène dont le poids atomique est l'unité ?

Or, les mémorables travaux de Rutherford n'avaient pas permis à ce savant de déterminer les charges nucléaires ou nombres atomiques de tous les éléments.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Des lacunes importantes subsistaient en particulier pour l'hydrogène. Ces lacunes risquaient d'enlever aux conclusions hardies du maître une partie de leur valeur, lorsque, en 1913, un événement scientifique important se produisit en Angleterre.

Un jeune physicien, Moseley, âgé de vingt-sept ans, et déjà rendu célèbre par des travaux de premier ordre, eut l'idée géniale que les rayons X émis par les substances sous le choc des rayons cathodiques devaient donner des indications sur la nature profonde de ces substances. Analogues aux radiations lumineuses ordinaires et n'en différant que par leur longueur d'onde beaucoup plus courte, les rayons X analysés au spectroscope donnent des spectres analogues à ceux de la lumière ordinaire, mais présentant l'énorme avantage d'être beaucoup plus simples et de ne comporter que quelques raies très caractéristiques.

Moseley s'attacha au même type de raies pour tous les éléments et il eut le bonheur de découvrir que la longueur d'onde de ces raies était, pour tous les éléments, proportionnelle à leur nombre atomique, tel que celui-ci avait été déterminé par Rutherford. Mais, contrairement à la méthode de Rutherford, la méthode de Moseley s'étendait sans distinction à tous les éléments, de sorte qu'il put déterminer tous les nombres atomiques que Rutherford n'avait pu atteindre.

Le sort des batailles frappa ce jeune génie si chargé d'espérances, comme tant d'autres. Moseley tomba mortellement blessé dans les tranchées des Dardanelles, pendant l'été de 1915.

Mais son œuvre restait. En particulier, il avait déterminé le nombre atomique ou charge positive du noyau de l'hydrogène et l'avait trouvé égal à l'unité, comme son poids atomique.

Ce résultat essentiel de la loi de Moseley frappa les physiciens.

L'association de ces deux unités fondamentales formant le noyau atomique de l'hydrogène se concrétisa dans leur esprit sous la forme d'un être physique réel, auquel ils donnèrent le nom de proton, et ils virent l'atome d'hydrogène constitué par un proton autour duquel gravite un électron périphérique solitaire, comme la Lune autour de la Terre.

Mais la découverte de Moseley nous conduit beaucoup plus loin. Rien, en effet, ne permet de supposer que l'association physique de ces deux unités ne se maintient pas dans le noyau complexe des éléments plus lourds que l'hydrogène, c'est-à-dire de tous les corps, autrement dit, que tous les noyaux atomiques ne sont pas formés par un assemblage de protons et d'électrons.

Or, nous savons que, contrairement à l'atome lui-même qui est électriquement neutre, son noyau présente une charge positive sensiblement égale à la moitié de son poids atomique. Dès lors, il nous est permis de concevoir un modèle de noyau atomique formé d'autant de protons qu'il y a d'unités dans le poids atomique de l'élément, associés à un nombre environ moitié moindre d'électrons.

Tiendrions-nous la clé du réduit central de l'atome, ou tout au moins de ses

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

matériaux ? S'il en était réellement ainsi, la vision prophétique qu'a eue, en 1815, le chimiste anglais Prout recevrait une splendide confirmation : le matériau de construction essentiel des atomes de tous les corps de la nature serait l'atome d'hydrogène.

Effectivement, Rutherford paraît être parvenu à expulser de l'hydrogène de certains atomes, en les soumettant à un bombardement intense de particules • particulièrement rapides.



Le chemin rapide que nous venons de parcourir à la force du raisonnement, à partir des belles expériences de Rutherford et de Moseley, quelque concluantes qu'elles puissent être, nous paraît terriblement suspendu dans le vide. Nous éprouvons le besoin de nous appuyer sur quelques faits d'observation solides, plus proches de nos sens, plus familiers.

Si vraiment ce nombre atomique de chaque élément, conçu par Rutherford et retrouvé par Moseley, a une réelle signification physique et est en relation si simple avec le poids atomique, nous devons en retrouver trace en examinant les caractéristiques essentielles de l'ensemble des éléments connus.

Tirons donc de la poussière du grenier cette vieille classification des éléments, dont le chimiste russe Mendeleïeff eut l'idée en 1870, et qui fut de son temps classée parmi les archives sans intérêt.

Un coup d'œil rapide nous montre que le numéro d'ordre de chaque élément dans cette classification correspond exactement à la série de leurs nombres atomiques, telle que celle-ci a été déterminée quarante-trois ans plus tard, par Rutherford et Moseley. De même, le numéro d'ordre de chaque élément est, à quelques exceptions près, sensiblement égal à la moitié de son poids atomique.

Les lacunes qui existaient dans cette classification et qui excitaient le scepticisme des esprits positifs de l'époque ont déjà, pour la plupart, été comblées par la découverte d'éléments nouveaux, due à la méthode des rayons X de Moseley. Il ne reste plus aux chercheurs de demain que six cases à combler.

Une fois de plus, dans l'histoire des sciences, une vue théorique géniale trouvait sa confirmation expérimentale, de nombreuses années après sa conception.

Arrêtons-nous pour contempler le spectacle impressionnant des éléments harmonieusement groupés dans le tableau de Mendeleïeff, et dont les combinaisons infiniment variées forment l'univers matériel. Un point particulièrement frappant est la périodicité des propriétés physiques et chimiques des éléments classés dans l'ordre de leurs nombres atomiques, et qui se répète régulièrement par séries de huit.

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Eh tête et hors série, l'atome hydrogène qui nous apparaît avec son proton unique autour duquel gravite un électron solitaire. Puis, l'hélium avec son noyau de quatre protons et deux électrons nucléaires, autour duquel tournent ses deux électrons périphériques.

En passant d'un élément de la classification au suivant, le noyau s'alourdit de deux protons et d'un électron nucléaire, tandis qu'un électron de plus prend sa place dans l'essaim périphérique.

Lorsque le nombre des électrons périphériques a atteint neuf, une deuxième couche se forme sous la couche frontière ; à chaque nombre d'électrons-frontières correspondent des propriétés chimiques et physiques dont la périodicité a été retrouvée jusqu'à l'aspect coloré et l'éclat métallique. Avec le professeur Vegard, d'Oslo, nous nous représentons les couches d'électrons périphériques se superposant en sphères concentriques au fur et à mesure que le noyau s'alourdit en passant aux éléments à poids atomique de plus en plus élevé, la couche frontière ne contenant jamais plus de huit électrons.

C'est par cette couche frontière que l'atome paraît bien nous exprimer ses propriétés chimiques et physiques courantes.

Voici, en particulier, qu'un trait de lumière éclaire à nos yeux cette fondamentale propriété de valence, dont l'explication était jusqu'ici pour nous dans l'ombre. Remarquons, en effet, que dans chaque série de huit éléments, la valence croît de un à quatre pour décroître à nouveau jusqu'à l'unité. Ces mains que les atomes nous ont paru se tendre les uns aux autres, ce sont les électrons frontières qui tendent à se souder à la couche frontière d'autres atomes en cherchant toujours à reconstituer à huit l'effectif de cette couche, soit en cédant, soit en captant d'un à quatre électrons.



Cependant, au fur et à mesure que nous montons et que le spectacle devient si nouveau, les difficultés se pressent plus nombreuses et plus sérieuses sous nos pas.

Une ombre, en particulier, obscurcit pour nous le tableau grandiose qui vient de s'offrir à nous. Si le poids atomique de chaque élément représente à nos yeux le nombre des protons qui constituent le noyau de son atome, comment interpréter les poids atomiques fractionnaires que présentent un si grand nombre d'éléments, le chlore par exemple ? Pouvons-nous supposer que le proton, cet élément premier de la matière, est, lui aussi, divisible ?

L'obstacle est de taille et serait peut-être resté à jamais infranchi si le professeur Frederick Soddy, d'Oxford, qui a été si souvent notre guide jusqu'ici, n'avait eu

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

lui-même à résoudre une difficulté d'un autre genre dans ses remarquables travaux sur les éléments radioactifs.

L'attention des expérimentateurs avait été appelée sur les résultats variés qu'ils obtenaient en mesurant le poids atomique du plomb provenant de différents minéraux. Leurs chiffres oscillaient entre 206,05 et 207,9. Toutes les expériences faites pour déceler des différences de propriétés physiques ou chimiques entre ces plombs étaient restées infructueuses. La même difficulté se retrouva avec d'autres métaux. Force fut donc d'admettre qu'on avait affaire à plusieurs métaux de propriétés identiques, mais de poids atomiques différents. A ces groupes de métaux, Soddy donna le nom d'éléments isotopes.

Comment pouvons-nous comprendre l'existence de ces pléiades d'isotopes ? La clé de cette nouvelle énigme, nous la trouvons avec Soddy, dans la connaissance que nous avons maintenant de la constitution du noyau de l'atome.

Les propriétés physiques et chimiques d'un élément dépendent, nous le savons, du nombre de ses électrons de frontière, donc de son nombre atomique. Or, il nous est facile de concevoir que deux éléments peuvent avoir des poids atomiques différents tout en ayant le même nombre atomique ; il suffit que, dans leur noyau, ces atomes aient un nombre différent de protons associés au même nombre d'électrons nucléaires.

Rien ne s'oppose donc à ce que des éléments de poids atomiques différents manifestent à nos sens les mêmes propriétés physiques et chimiques.

Dès lors, nous comprenons sans peine l'existence d'éléments à poids atomique fractionnaires ; ces éléments nous apparaissent comme constitués par l'association de plusieurs isotopes à poids atomiques entiers, rigoureusement inséparables et indiscernables par nos moyens d'investigation actuels, le nombre des isotopes associés pouvant aller, comme pour l'étain, jusqu'à onze.



Maintenant que nous avons franchi cet obstacle sérieux, sommes-nous hors de difficulté et voyons-nous enfin le sommet près de nous ? Hélas ! devant nous, l'arête effroyablement vertigineuse se redresse et s'effile, hérissée d'escarpements qui nous font frissonner. Au-dessus de nos têtes, elle se perd indécise dans la nuée. Jusqu'où se prolonge-t-elle ? Le point culminant, s'il y en a un, est-il accessible aux grimpeurs les plus audacieux et les plus entraînés ? Tant d'énigmes restent à résoudre, qui semblent se multiplier au fur et à mesure que les connaissances humaines progressent !

Comment l'atome peut-il devenir source de lumière ? A quelle constitution intime de l'atome correspondent les raies si caractéristiques du spectre de chaque élément ?

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

Tels sont les grands problèmes actuels. Des équipes de jeunes savants, acrobates de la physique mathématique, se sont lancés hardiment à l'assaut de ces nouveaux sommets.

Nous nous sentons, quant à nous, parvenus, cette fois, à notre col des Paresseux, et nous suivrons seulement des yeux ces hardis grimpeurs pendant leurs premiers pas.

Voici Niels Bohr, de Copenhague. En 1913, il remarque qu'il est impossible de concevoir qu'un électron gravitant sur son orbite puisse, par ce mouvement vibratoire, émettre des radiations lumineuses ; car, ce faisant, il perdrait de l'énergie, donc de la vitesse, et tendrait ainsi peu à peu à tomber sur le noyau. Il imagine en conséquence que chaque électron peut tourner autour du noyau sur une série d'orbites différentes ; c'est seulement en sautant d'une orbite sur l'autre qu'il produirait une radiation lumineuse.

Prenant comme point de départ ces hypothèses et d'autres, Bohr édifie des modèles d'atomes dont les orbites électroniques s'entre-croisent en pléiades d'ellipses harmonieuses s'étalant autour du noyau comme de larges pétales. Nous rêvons d'étranges fleurs des Mille et une Nuits.

La conception de Bohr se heurte elle-même à de sérieuses difficultés ; mais l'heure n'est plus, dans les sciences, au scepticisme positiviste stérilisant. Son incontestable fécondité suscite des enthousiasmes. En Allemagne, Sommerfeld reprend le flambeau, et, à sa suite, des équipes de chercheurs venus du monde entier, parmi lesquels, hélas ! si peu de noms français, s'élancent sur les traces de Rutherford et de Bohr. Ils disparaissent à nos yeux très haut vers les quanta de Planck, les niveaux d'énergie, dans le domaine très subtil de la nouvelle physique mathématique.

Un jour, peut-être, essayerons-nous de les suivre !



Au terme de notre longue course, nous restons saisis d'admiration devant ces merveilles de la création que sont les atomes.

Création, avons-nous dit ! Est-ce là un terme qui a cours parmi les hommes de science dont nous venons de partager les travaux et les émotions ?

Interrogeons quelques-uns parmi les plus grands qui aient pénétré l'infiniment petit de la matière.

Voici le grand initiateur, Maxwell, qui nous a guidés à travers les foules moléculaires. Il ne connaissait encore que bien peu de chose de l'atome. Écoutons

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

cependant ce qu'il en disait dans un discours célèbre qu'il prononça en 1873 à la British Association (1) :

Une molécule d'hydrogène (nous dirions un atome), qu'elle soit dans Sirius ou dans Arcturus, exécute ses vibrations exactement dans le même temps.

Dans tout l'univers, par conséquent, chaque molécule porte sur elle le cachet d'un système métrique, imprimé aussi distinctement que sur le mètre des Archives de Paris ou la double condés royale du temple de Karnac.

.....
Aucune des opérations de la Nature, depuis que la Nature a commencé, n'a produit la moindre différence dans les propriétés d'aucune molécule. Nous ne saurions donc attribuer, soit l'existence des molécules, soit l'identité de leurs propriétés, à aucune des causes que nous appelons naturelles.

D'autre part, l'égalité parfaite d'une molécule avec toutes les autres de la même espèce lui donne, comme l'a très bien dit sir John Herschel, le caractère essentiel d'un objet manufacturé et exclut l'idée qu'elle est éternelle ou qu'elle existe par elle-même.

Ainsi, nous avons été conduits par un chemin strictement scientifique très près du point auquel la science doit s'arrêter ; non qu'il soit plus interdit à la science d'étudier le mécanisme interne d'une molécule, qu'elle ne peut démonter, que d'examiner un organisme qu'elle ne peut reconstituer. Mais, en remontant dans l'histoire de la matière, la science est arrêtée quand elle assure elle-même, d'une part, que la molécule a été construite et, d'autre part, qu'elle n'a été faite par aucun des processus que nous appelons naturels.

La science n'est pas compétente pour raisonner sur la création de la matière elle-même. Nous avons atteint les extrêmes limites de nos facultés pensantes quand nous avons admis que, parce que la matière ne peut pas être éternelle, ni exister par elle-même, elle doit avoir été créée.

(1) Cité par Soddy dans son ouvrage *Le Radium*. Alcan, p. 236.

Mais la science, nous venons de le voir, a terriblement progressé depuis Maxwell. Le grand savant parlerait-il encore de même aujourd'hui ?

Interrogeons donc un des grands physiciens de la dernière heure, qui ont devant nous démonté l'atome, Frederick Soddy, professeur à l'Université d'Oxford, membre de la Société Royale de Londres :

Sur ce point fondamental (que tous les atomes d'un même élément sont exactement identiques), l'évidence est aujourd'hui beaucoup plus complète et beaucoup plus frappante qu'elle n'était en 1873, et nous croyons plus fermement que jamais à l'absolue similitude de tous les atomes d'un même élément.

La base principale du raisonnement de Maxwell n'a donc fait que subir une confirmation éclatante.

Le fait nouveau essentiel, c'est que nous ne considérons plus maintenant l'atome comme une chose simple, mais « comme un mécanisme infiniment complexe ».

Le professeur Rowland, de Baltimore, compare les atomes d'un même élément à une multitude innombrable de pianos aux milliers de cordes qui seraient tous parfaitement accordés entre eux. Le constructeur de ces merveilleux instruments est-il le hasard ?

BIED-CHARRETON.
DE LA TURBINE A L'ATOME.

Le professeur Schuster y voit des myriades d'horloges montées et réglées pour marcher avec la même période :

Si toutes ces horloges, déclare-t-il, étaient réglées à la même heure, aucune d'elles ne varierait, même d'une seconde, après plusieurs jours. Aucun horloger ne pourrait fabriquer de telles horloges.



Aucun horloger, sauf Un seul !

Est-ce l'un de nous qui, à ce moment, rompt doucement le silence absolu ?

Coeli enarrant gloriam Dei et opera manuum ejus annuntiat firmamentum (Ps. xviii, 2).

Et voici que la montagne nous renvoie l'écho d'une autre grande voix :

Dieu qui est éternel, immense et d'une puissance infinie, fait dans le ciel et sur la Terre des choses admirables (1)...

(1) L'imitation de Jésus-Christ, dernier chapitre, dernier verset.

VIBRATIONS

$$y = \sin x$$

« Au cartel d'or
qui s'endort
La lyre du pendule à peine se balance. »

Notre regard et notre pensée se fixent avec obsession sur le petit pendule doré, comme si, sous son invariable et monotone balancement qu'anima un artisan du xviii^e siècle, nous pressentions quelque chose d'une immense portée, donnant la clé de l'univers physique.

Du point le plus haut de sa course, son poids le précipite au point le plus bas qu'il franchit par sa vitesse acquise, pour remonter jusqu'à épuisement de sa force vive. Puis il retombe pour remonter, et ainsi de suite de gauche à droite, puis de droite à gauche. Avec une régularité mathématique, le pendule oscille à la poursuite de sa position d'équilibre qu'il dépasse à chaque coup. A chaque balancement, son oscillation est entretenue par une légère impulsion qu'il reçoit du ressort et qui compense la force vive absorbée par l'entraînement du mécanisme. Il vibre lentement suivant une période et une amplitude de vibration constantes.

Quand viendra à mourir, sans successeur, la main qui, après tant d'autres, prend soin de remonter la petite horloge, le ressort faillira. L'impulsion, précédemment reçue par le pendule à chaque balancement, faisant maintenant défaut, les oscillations s'amortiront progressivement jusqu'à ce que le pendule trouve enfin sa position d'équilibre verticale et s'y fige dans l'immobilité. Tel nous apparaît le plus simple des mouvements vibratoires que les physiciens ont appelé le mouvement pendulaire.



Arrachons-nous à la fascination du vieux cartel et faisons un tour dans le village de France qui somnole sous le grand soleil de midi.

Du bord de la route, un câble d'acier, ancré dans le sol, s'élève d'un trait jusqu'au sommet de la colline en une courbe d'une pureté géométrique. Entre deux

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

charges de bois qui glissent le long du câble, saisissons celui-ci et imprimons-lui vigoureusement quelques oscillations transversales. Nous voyons les oscillations se propager de proche en proche le long du câble en un train d'ondes qui gagne en serpentant le sommet de la colline. Quelques secondes se passent et voici que le train d'ondes nous revient de l'extrémité supérieure sur laquelle il s'est réfléchi comme sur un miroir.

D'un sommet à l'autre de deux ondulations voisines, nous avons remarqué une longueur constante c'est la longueur d'onde. Les ondes ont même hauteur, c'est leur amplitude.

Continuons à secouer. Les ondes montantes vont se superposer aux ondes descendantes; et, de la combinaison des ondes directes et réfléchies, va naître un état stable de vibration du câble. Son aspect va changer : voici qu'il se divise en un certain nombre de zones séparées par des points qui restent immobiles.

Entre ces noeuds fixes, le câble vibre en formant des ventres où l'amplitude des oscillations est la plus grande. En observant attentivement, nous aurions pu remarquer que la distance entre deux noeuds était égale à une demi-longueur des ondes primitives.

Fixons bien dans notre esprit cette expérience banale que tant de fois peut-être nous avons vue sans la remarquer. Sans nous en douter, nous venons d'assister à peu de frais au cinéma tourné au ralenti de la généralité des grands phénomènes de la nature.



Gagnons la rivière qui traverse le village. Du vieux pont une pierre tombe et frappe le miroir d'eau que ne trouble aucun souffle. Sous le choc la nappe liquide cède, s'agite, puis vibre un instant comme une membrane élastique avant de retrouver son équilibre horizontal. Chaque vibration se communique de proche en proche à la surface d'eau environnante, et des ondes prennent naissance, qui s'éloignent paresseusement en anneaux concentriques où se tord douloureusement l'image des peupliers voisins.

Notre regard suit ces anneaux qui s'agrandissent, s'étalent et vont très loin s'amortir après s'être réfléchis contre les piles massives du pont suivant des cercles qui se croisent sans se contrarier. De crête à crête des petites vagues circulaires, nous notons la longueur de l'onde vibratoire en mouvement sur la nappe liquide, comme nous l'avons notée tout à l'heure sur le câble tendu. Leur hauteur nous donne l'amplitude des ondes.

Mais regardons plus loin : voici un pauvre petit bouchon qui dormait sur l'eau immobile. La première onde l'atteint et le voici qui se met à danser sur place. Au passage de chaque onde, il monte, descend, remonte : il vibre en complet accord

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

avec la vibration centrale qui a donné naissance aux ondes. D'un geste instinctif, notre regard se reporte vers l'antenne réceptrice de T. S. F. qui raye le ciel d'un pignon à l'autre du village : une association d'idées encore irraisonnée s'établit entre le bouchon perdu sur l'onde et l'antenne en apparence inerte.

Sur la rive, une fourmi. Pour elle, la rivière c'est la mer, et les innocentes petites ondes qui viennent caresser la berge, c'est la grande houle qui traverse l'océan et vient s'écraser contre la côte bretonne en effets d'eau majestueux : identité absolue des deux phénomènes provoqués, ici par la petite pierre tombée dans l'eau, là-bas par la tempête ou le séisme lointain. Simple différence de grandeur ici, ondes courtes (10 à 20^{cm} de longueur) et de faible amplitude ; là-bas, au large du grand océan, longueur d'onde atteignant 100^m et amplitude pouvant dépasser 10^m. Dans les deux cas, même vibration de la nappe liquide se transmettant en ondes planes avec une vitesse constante, caractéristique du milieu liquide.



Dans l'ombre du clocher, la cloche s'ébranle pour sonner l'Angélus. Sous le choc du battant, la masse de bronze se comprime puis se dilate ; elle vibre. Le fondeur à qui cette cloche doit le jour, mettant en jeu un art expérimental reçu d'une longue lignée d'ancêtres, a combiné amoureusement sa matière et ses dimensions, de manière à la faire vibrer à la période de 870 vibrations par seconde correspondant au son très pur de la troisième octave.

L'air au contact du bronze a aussitôt vibré à l'unisson, et l'ébranlement vibratoire s'est transmis avec sa période intacte, en ondes sphériques qui se sont élancées à la vitesse de 330^m à la seconde. Pendant une oscillation vibratoire, l'onde a parcouru une distance de 330^m divisée par 870 vibrations, c'est-à-dire 76^{cm} ; cette distance mesure la longueur d'onde du la³ dans l'air.

Tel notre petit bouchon sur la rivière, notre oreille vibre dès que l'atteint l'onde sonore et transmet à notre cerveau le son très pur de la cloche argentine, et ce son se traduit pour nous en un appel à la prière.



Ainsi que l'archet sur les cordes d'un violon, la brise qui s'élève caresse en passant les fils télégraphiques. L'acier déplacé de son équilibre par le frottement de l'air, entre en vibration, et des ondes de compression et de dilatation se propagent le long des fils à une vitesse d'environ 5000^m à la seconde. Comme nous faisons dans notre enfance, appliquons notre oreille au poteau et laissons-nous bercer par la symphonie monotone qui nous pénètre comme le charme

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

d'une lande sauvage.

Chaque note est la traduction dans notre cerveau de la vibration longitudinale de chacun des fils, plus ou moins aiguë suivant que la période est plus ou moins courte, et la brise variant de vitesse module ces accords en un chœur mélancolique.



Le Soleil de midi remplit le paysage d'une lumière éclatante : blanc cru de la falaise crayeuse qui diffuse impitoyablement à nos yeux la gamme complète des lumières colorées que nous envoie le Soleil en une superposition blanche ; bleu profond du ciel dont le physicien anglais, Lord Rayleigh, nous a récemment dévoilé le mystère ; verdure nuancée des prairies et des arbres dont le feuillage absorbe, en vue de son activité chimique, une partie des lumières colorées reçues du Soleil et ne diffuse que la gamme complémentaire des verts reposants ; taches écarlates des coquelicots qui, à l'inverse du feuillage, ne diffusent que le rouge ; reflets infiniment variés du miroir des eaux qui traduisent à nos yeux la synthèse des actions de réflexion, réfraction, absorption et rayonnement que subit la lumière du Soleil par son passage sur la nappe liquide.

Nous restons saisis par le charme profond des jeux de couleur de ce simple paysage de France. Tout à l'heure, le soir va sortir de ces buissons, puis monter de proche en proche en gagnant le sommet des collines où s'éteindront les dernières couleurs. Lorsque le dernier rayon direct du Soleil aura disparu, la lumière diffusée par l'air, les poussières, la brume du soir, commencera elle-même à faiblir. Ce sera le crépuscule, l'œil ne distinguera plus que des masses grises sur fond noir et bientôt tout se fondra dans la nuit noire. La preuve sera faite une fois de plus que cette féerie de lumière nous vient du Soleil, mais comment ?

Une longue lignée de savants et de philosophes se sont posé cette question en se départageant entre deux hypothèses. La plus simple voulait que le Soleil nous envoyât la lumière sous forme d'un bombardement de corpuscules colorés dont les trajectoires constituaient les rayons du Soleil. Cette hypothèse est connue sous le nom de théorie de l'émission. Dès le ^v^e siècle avant Jésus-Christ, le philosophe Empédocle d'Agrigente l'enseignait. Jusqu'au ^{xviii}^e siècle, elle fut généralement incontestée et de très grands noms, tels que Kepler, Newton, Laplace, figurent parmi ses adhérents.

Mais il était donné au génie d'Aristote d'entrevoir une autre explication beaucoup plus hardie et qui devait triompher 22 siècles plus tard. La lumière nous parviendrait du Soleil sous forme d'ondes analogues à celles que nous venons de déceler autour de nous sous des formes déjà si variées. Descartes reprit cette explication ; mais il appartient au physicien hollandais Christian Huyghens, fils d'un seigneur de Zuylichen, de préciser et d'approfondir le premier cette

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

explication. Dans son traité de la lumière paru en 1690, il exposa l'hypothèse des ondulations et l'opposa hardiment à l'hypothèse de l'émission, défendue à la même époque par son grand collègue anglais, Isaac Newton.

Les deux hypothèses de l'émission et des ondulations s'affrontèrent pendant tout le xviii^e siècle jusqu'à l'heure où un autre Anglais, Young, mais surtout le grand physicien français, Fresnel, père de la science optique moderne, vinrent au début du xix^e siècle trancher le différend en consacrant l'exactitude de la théorie des ondulations par une longue série d'expériences et de déductions célèbres et incontestablement concluantes.

Le centenaire de la mort de Fresnel, fêté en 1927, a vulgarisé la gloire de ce Français qui, entré à 16 ans à l'Ecole Polytechnique, donna avant 30 ans toute la mesure de son génie. Cent jours de loisir forcé, dus à sa destitution d'ingénieur des ponts et chaussées pour s'être joint aux troupes qui tentèrent d'arrêter Napoléon au retour de l'île d'Elbe, furent l'occasion des premières recherches qui devaient révolutionner la physique (1).

(1) L'oeuvre purement scientifique de Fresnel se complète par une oeuvre considérable d'ingénieur. Fresnel est le créateur des grands phares modernes ; et depuis son temps, le service des phares français est resté à la tête des services similaires de tous les autres États et fait loi dans le monde entier.

Nous ne tenterons pas de suivre Fresnel dans ses délicates expériences de miroirs multiples, ses découvertes sur la diffraction, les anneaux colorés, les franges, les zones obscures qu'il a observées en pleine lumière et expliquées mathématiquement. Marquons seulement un temps d'arrêt à l'expérience cruciale qui a définitivement consacré la théorie des ondes lumineuses.

Vers 1850, les physiciens français Foucault d'une part, Fizeau et Bréguet de l'autre, mesuraient comparativement la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau et trouvaient que cette vitesse est plus grande dans l'air que dans l'eau. Ce résultat cadre avec les conséquences mathématiques de la théorie des ondes lumineuses ; il est, par contre, en opposition formelle avec les déductions de la théorie de l'émission. Cette dernière était ainsi définitivement condamnée.



De quel oeil nouveau allons-nous maintenant contempler le paysage attachant qui nous révèle un de ses nouveaux secrets ? Ondes lumineuses, la blancheur éclatante de cette falaise, la gamme des verts de cette frondaison, les taches écarlates de ces coquelicots, le bleu du ciel, les reflets soyeux de la rivière ! Mais nous savons que des ondes ne sont que des vibrations en mouvement. Voici donc la lumière rattachée aux mouvements vibratoires si différents en apparence que nous venons d'observer ! A quelle vitesse se transmettent ces ondes mystérieuses qui constituent la lumière ? A la vitesse de la lumière elle-même, et nous savons

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

que celle-ci atteint le chiffre de 300.000km à la seconde. Quelque chose vibre donc en se déplaçant à cette vitesse vertigineuse et produit sur nos yeux, en les atteignant, l'impression de lumière. De même que pour les ondes vibratoires que nous venons d'observer, la caractéristique des ondes lumineuses doit être la longueur d'onde, c'est-à-dire l'espace parcouru par la lumière pendant une vibration.

Les physiciens ont, par des méthodes délicates, déterminé cette longueur d'onde pour chacune des lumières simples qui composent la lumière blanche du Soleil et que l'atmosphère lavée par une grande pluie nous décèle dans l'arc-en-ciel. Ces longueurs sont si petites qu'il a fallu créer pour les mesurer une unité de longueur spéciale, le micron, qui vaut un millième de millimètre et à laquelle on a donné comme symbole la lettre grecque μ . Les longueurs d'onde, ainsi mesurées, varient depuis $0\mu,4$ pour le violet jusqu'à $0\mu,7$ pour le rouge, en passant par toutes les valeurs intermédiaires pour les couleurs de l'arc-en-ciel.

De pareilles longueurs d'onde correspondent, pour la vitesse de 300.000km à la seconde à laquelle les vibrations lumineuses se déplacent, à des périodes vibratoires dont la petitesse défie toute imagination et nécessite l'alignement de dix-huit à vingt zéros après la virgule pour les exprimer en fraction de seconde !



La lourde chaleur de midi nous fait reprendre contact avec le site de France qui flamboie dans l'ardeur de juillet. Les couches d'air surchauffées au contact du sol oscillent en déformant par réfraction la vision des objets lointains qui semblent se mouvoir comme un flot.

Ce soir, lorsque le Soleil aura disparu, un brusque refroidissement va tomber sur nos épaules. Ce sont donc bien ces radiations qui nous viennent du Soleil, qui sont cause de la chaleur qui nous inonde.

Notre ombre nous suit sur la route, c'est donc que nous absorbons ou renvoyons ces radiations. Nos vêtements noirs de citadins nous étouffent, tandis que cette paysanne vêtue de clair paraît à l'aise. Le corps noir absorbe donc toutes les radiations qu'il reçoit et les transforme en chaleur.

Dans ce laboratoire, un prisme de verre. Au récepteur grossier que constitue notre corps, substituons une pile thermo-électrique sensible et promenons-la du violet vers le rouge dans l'arc-en-ciel, le spectre, développé par la lumière blanche du Soleil tombant sur le prisme. Notre récepteur thermo-électrique accuse un développement de chaleur différent suivant les couleurs, témoin de la densité plus ou moins grande des radiations de chaque couleur.

Continuons à déplacer notre récepteur dans l'ombre qui suit le rouge, voici qu'il continue à accuser de la chaleur. Allons en sens inverse, au delà du violet, même

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

résultat. En dehors des radiations visibles que nous envoie le Soleil, il y a donc des radiations invisibles infrarouges, et ultraviolettes.

Mais au delà de ces premières ondes invisibles, le Soleil n'en émet-il pas encore d'autres dont les longueurs d'ondes sont encore plus grandes ou encore plus petites ? Notre esprit généralisateur nous porte à les imaginer et à les rechercher. Toutefois avant de nous lancer à travers ce champ indéfini de recherches, une question capitale nous reste à résoudre.



Nous avons admis, à la suite d'Huyghens, de Fresnel et de tous les savants modernes que la lumière est un mouvement vibratoire qui se transmet sous forme d'ondes à la vitesse de 300.000^{km} à la seconde. Mais pour qu'il y ait vibration, il faut qu'il y ait quelque chose qui vibre.

Or l'absence absolue de matière pondérable dans les espaces interplanétaires n'a jamais été mise en doute par aucun savant. Comment un mouvement vibratoire, quel qu'il soit, peut-il donc nous parvenir du Soleil et des étoiles qui, elles aussi, nous envoient leur lumière sous l'aspect de points lumineux ? Telle était la grande objection qui avait fait reculer des lignées de très grands savants, dont le génial Newton, devant l'hypothèse des ondulations et les avait fait rester fidèles à la théorie de l'émission.

Huyghens leva l'objection par une hypothèse hardie. Il est bien exact que les espaces célestes sont vides de toute matière pondérable, c'est-à-dire sensible à nos moyens de pesée. Mais est-ce à dire qu'il y ait le vide absolu dans ces espaces infinis dont le silence effrayait Pascal ? Non, répond Huyghens, l'Univers entier est noyé dans un milieu élastique, impondérable, l'éther, qui transmet sous forme d'ondes, dans l'immensité des espaces, les vibrations émises par tous les astres.

Une pareille hypothèse n'aurait été qu'un artifice commode, une entité de plus comme s'en contentaient trop les savants et les philosophes d'autrefois, si elle n'avait pas reçu une confirmation expérimentale directe. Il fallait donc prouver par une expérience directe, l'existence d'un milieu vibrant autre que la matière pondérable.

Il appartient au physicien français Fizeau de réaliser cette preuve directe en 1851, en montrant que la vitesse de la lumière reste sensiblement la même, quelle que soit la vitesse des milieux pondérables à travers lesquels elle se propage. Ce n'est donc pas la matière pondérable qui transmet les vibrations lumineuses, comme elle transmet les vibrations sonores, mais un autre milieu indépendant de celle-ci. Nous avons dit que la vitesse de la lumière restait sensiblement la même ; l'expérience de Fizeau montra en effet qu'il y avait bien un certain entraînement partiel des ondes lumineuses par les milieux pondérables traversés, Les expériences de Michelson et Morley, en 1886, confirmèrent cet entraînement

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

partiel, tout en ouvrant accidentellement la porte du domaine étrange et incertain de la Relativité qu'Einstein devait si audacieusement et brillamment explorer jusque dans ses confins les plus troublants.



Ondes liquides, ondes sonores, ondes solides, ondes lumineuses, ondes vibratoires, longitudinales et transversales de grande et de courte longueur : ces mots, qui évoquent en nous une terminologie devenue familière, nous font porter les yeux vers les deux fils qui rayent le ciel d'un pignon à l'autre du logis dont la silhouette domine la rivière. Une fenêtre ouverte nous envoie les accents de l'Apothéose de Marguerite chantée par une voix puissante et pure. Quelques personnes écoutent, groupées autour d'un coffret noir orné de cadrans et de lampes électriques spéciales. Leur pensée paraît suivre très loin les mouvements de la cantatrice et de l'orchestre qui, à cet instant précis, font vibrer l'air d'une salle d'audition parisienne des mêmes accents qui frappent nos oreilles.

Par quelle voie ce petit village, perdu au cœur de France, reçoit-il intégralement les vibrations sonores infiniment complexes d'une voix humaine accompagnée d'un orchestre de cent musiciens qui exécutent quelque part sur les rives de la Seine ?

Comme installations visibles, presque rien. Ici, nous avons tous les appareils de réception sous les yeux ; le coffret ne contient que quelques organes électriques destinés à mettre l'appareil récepteur en accord avec le poste d'émission, à amplifier les vibrations reçues et à les transformer en vibrations acoustiques perceptibles à l'oreille. Là-bas, l'œil ne distinguerait pas les écouteurs téléphoniques qui, dans la salle d'orchestre, recueillent les vibrations musicales et les transmettent par fil dans les sous-sols de la tour Eiffel où se trouve le poste d'émission radiophonique.

Salle basse occupée en son centre par deux socles en maçonnerie ; sur chacun de ces socles, un caisson encadré de deux bobines robustes. Dans chaque caisson pénètrent de part en part deux fortes tiges métalliques auxquelles aboutissent des câbles sortant du sol. Si nous pouvions regarder à l'intérieur de ces caissons, nous verrions briller entre les deux tiges métalliques la lumière éblouissante de l'arc voltaïque. A droite et à gauche, des tableaux de marbre couverts d'instruments de mesure et de commande : ampèremètres, voltmètres, interrupteurs, coupe-circuit.

N'essayons pas de scruter le fonctionnement complexe de ces appareils et contentons-nous de nous faire une idée d'ensemble de leur rôle.

Ici nous retrouvons le fait, dominant en T. S. F., des vibrations asservies par l'intelligence humaine aux fins les plus élégantes. Par l'action de ces appareils, un courant électrique changeant cent mille fois de sens par seconde est entretenu

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

dans un circuit. Cette vibration électrique ultra-rapide serait absolument constante quant à l'amplitude des oscillations si, par un dispositif électrique d'une rare ingéniosité, les vibrations de la voix humaine transmise téléphoniquement dans cette enceinte ne venaient se superposer dans le même circuit aux vibrations électriques, et imposer à ces dernières leurs variations d'amplitude infiniment nuancées.

Les vibrations électriques puissantes sont donc asservies à reproduire par leur variation d'amplitude toutes les modulations musicales infiniment variées et délicates de la voix humaine dans lesquelles elles sont pour ainsi dire servilement moulées.

En un mot, la voix humaine a reçu un support électrique de grande puissance, et ce support est lancé dans l'antenne de la Tour où il se stabilise sous la forme d'une vibration électrique à haute fréquence, strictement asservie aux modulations de la voix humaine.

Que se passe-t-il ensuite entre la grande antenne émettrice de la Tour et les deux bouts de fil de fer perdus 500^{km} plus loin dans le fond du pays de France où nous méditons ? Comment ces deux fils deviennent-ils avec une simultanéité presque absolue le siège de vibrations électriques identiques à celles de l'antenne de la Tour, asservies aux mêmes modulations de la voix humaine ?



Interrogez votre fils de dix-huit ans. Tout étonné de votre question, il vous répondra : mais ce sont les ondes de T. S. F. Comment ne savez-vous pas ?

La question a paru moins naïve aux savants d'il y a cent ans. Ceux-ci connaissaient les actions électriques à distance. C'est même par les actions à distance que les premiers phénomènes électriques se sont décelés aux hommes : six cents ans avant Jésus-Christ, Thalès de Milet remarque que l'ambre (elektron) attire les corps légers. Un médecin de la reine Elisabeth d'Angleterre, William Gilbert, observe au xvi^e siècle la même attraction sur les pierres précieuses, la résine, le verre. Volta, au xviii^e siècle, passe sa vie à approfondir les phénomènes d'influence électrique à distance. Puis les grandes découvertes se précipitent : le Danois Oersted observe, au début du xix^e siècle, l'action d'un courant électrique sur l'aiguille aimantée ; le grand physicien anglais Faraday énonce les lois de l'induction électrique, c'est-à-dire de l'action des courants électriques entre eux.

A la même époque, un cerveau de grand génie commence à s'acharner, en Angleterre, au problème des actions électriques à distance : Maxwell passera une vie à scruter comment ces actions s'exercent et dans quel milieu elles se propagent.

Mais pour observer ces actions à distance, il fallait disposer de moyens puissants

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

pour produire des courants alternatifs à très haute fréquence. Un, premier pas avait été fait dans cette voie par le physicien Feddersen. Celui-ci, observant l'étincelle de décharge d'un condensateur électrique sur un miroir tournant à très grande vitesse, avait remarqué que cette étincelle était constituée par une suite de décharges alternatives changeant de sens environ cent mille fois par seconde et s'amortissant en un temps très court. Ce physicien, montrant ainsi la possibilité de produire des courants alternatifs à très haute fréquence en provoquant de puissantes étincelles électriques, ouvrait la voie aux précurseurs de la T. S. F.

Mais arrêtons-nous à cette étincelle. L'espace qui l'environne est modifié suivant les lois classiques de l'influence électrostatique et de l'induction électromagnétique. Deux questions se posent : dans quel milieu et avec quelle vitesse ces actions se propagent-elles autour de l'étincelle ?

Dans quel milieu ? Ce ne peut être dans l'air, puisque ces actions se propagent dans le vide. C'est alors que Faraday suppose hardiment que ces actions électriques se transmettent dans le milieu éther que les opticiens ont imaginé pour la transmission des ondes lumineuses.

Avec quelle vitesse ? Malgré l'instantanéité apparente de la transmission des phénomènes, électriques, notre esprit n'admet pas la notion de transmission instantanée. Si grande qu'elle soit, il y a donc une vitesse limitée de propagation de l'induction électrique dans l'espace. Scrutant la question par des voies mathématiques élevées, Maxwell a établi que cette vitesse doit être celle de la lumière, c'est-à-dire 300.000^{km} à la seconde ! Quarante ans plus tard, en 1893, des expériences directes faites par M. Blondlot confirmaient l'exactitude de cette prévision théorique du grand savant anglais.

Ainsi donc, au milieu du XIX^e siècle, les idées des savants en étaient au point suivant : la décharge oscillante d'un condensateur électrique crée autour d'elle un champ d'induction électromagnétique qui vibre à l'unisson de la décharge vibratoire et se transmet dans l'éther à la vitesse de la lumière.

Mais cette vibration électrique qui se déplace prend donc bien, comme toutes les autres vibrations que nous avons observées, la forme d'ondes. Il restait à mettre en évidence ces ondes et à mesurer leurs longueurs, comme on l'avait déjà fait pour les ondes liquides, les ondes sonores, les ondes lumineuses.

Ce fut l'oeuvre du physicien allemand Henri Hertz, mort prématurément en 1892, et de ses célèbres expériences date véritablement la naissance de la télégraphie sans fil. Ce savant, dont la vie fut si courte et si bien remplie, se destina d'abord à la carrière d'architecte; mais il fut bientôt poussé par une vocation irrésistible vers la science pure. Remarqué et encouragé par le physicien Helmholtz, il fut nommé professeur à Karlsruhe : c'est là qu'il accomplit sur les ondes électriques, en 1890, ces travaux qui devaient immortaliser son nom par la dénomination d'ondes hertziennes.

Par une technique extrêmement délicate, il réalisa un excitateur capable de produire des décharges électriques oscillantes changeant de sens cinquante

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

millions de fois par seconde. Puis il réussit à stabiliser les ondes électriques émises par ces décharges continues en les faisant réfléchir sur un miroir métallique. Sans entrer dans l'analyse complète de ce phénomène de stabilisation d'ondes électriques, rappelons-nous, pour le comprendre, la stabilisation des vibrations de notre câble par réflexion des ondes sur les extrémités de celui-ci et la formation de noeuds immobiles et de ventres à vibrations maxima.

Avec un appareil spécial qu'il nomma résonateur, Hertz explora alors l'espace compris entre l'étincelle de son excitateur et le miroir réflecteur des ondes électromagnétiques. Il put ainsi déceler l'emplacement des noeuds où les actions d'induction étaient nulles, et des ventres où ces actions étaient les plus fortes. Rappelons-nous encore que sur notre câble, la distance entre deux noeuds immobiles était égale à une demi-longueur de l'onde primitive, et nous voyons comment Hertz est arrivé à mesurer la longueur d'onde des ondes électromagnétiques émises par l'étincelle électrique.

De ces magistrales expériences, la T. S. F. était née. L'ère des réalisations commença aussitôt.

Successivement, des savants et des ingénieurs, parmi lesquels le Serbe Tesla, le Russe Popoff, et surtout notre compatriote Branly, apportent leur pierre à l'édifice que couronne enfin la première communication radiotélégraphique réalisée en 1896 par le jeune Italien Marconi, entre la France et l'Angleterre.

Puis, à pas de géant, les progrès s'accomplissent : téléphonie sans fil, radiodiffusion vulgarisée et mise à la portée de tous, musique hertziennne, demain peut-être radiovision...



Laissons la technique poursuivre sa course effrénée vers des réalisations que notre esprit n'entrevoit pas sans un certain trouble et regardons le beau ciel dont le bleu très pur s'approfondit à l'approche du soir.

Ondes lumineuses, cette féerie de couleurs qui nous tient sous le charme ; ondes électriques, ces radiations hertziennes qui sillonnent le ciel, insensibles à tous nos sens : toutes deux voyagent à la même vitesse de 300.000km à la seconde. Un pas restait à franchir. Maxwell l'a franchi : les ondes lumineuses ne sont que des ondes électromagnétiques ; elles n'en diffèrent que par leur longueur d'onde différente : de 30 à 30.000m pour les ondes hertziennes utilisées en T. S. F., de 4 à 8 dix millièmes de millimètre pour les ondes lumineuses.

Et voici qu'une vision très vaste d'unité et de continuité dans les phénomènes lumineux, calorifiques et électriques apparaît à nos yeux.

Cette vision d'unité doit-elle se limiter à ce domaine déjà si étendu ? Non, car

BIED-CHARRETON. DE LA TURBINE A L'ATOME.

c'est dans une marche continue vers l'unité que se précipitent les découvertes scientifiques depuis le début de notre siècle. Rayons α pénétrants du radium, rayons X apparaissent successivement comme n'étant que des ondes électromagnétiques de longueur d'onde infiniment petite ($0,000005$ à $0,0012$).

Ondes électromagnétiques également, ces radiations mystérieuses qui ont été récemment décelées comme nous venant des astres infiniment lointains.

Ainsi apparaît à notre esprit en une unité saisissante le tableau des grands phénomènes de la nature comme ne formant qu'une gamme continue de vibrations électromagnétiques se transmettant dans l'éther à la vitesse de 300.000km à la seconde et ne différant que par leur période vibratoire, c'est-à-dire leur longueur d'ondes.

Rayon α du radium	$0,000005$
Rayons X	$0,0002$ à $0,0012$

Jonction des ondes des rayons X et des ondes ultraviolettes.

Rayons ultraviolets	$0,2$
Rayons lumineux violets..	$0,4$
Rayons lumineux verts	$0,5$
Rayons lumineux rouges	$0,7$
Rayons infrarouges	$0,8$ à 314μ

Jonction des ondes infrarouges et des ondes hertziennes.

Ondes hertziennes les plus courtes utilisées en T. S. F.	30m
Ondes hertziennes les plus longues utilisées en T. S. F.	30000m

Mais quelque immense que soit le domaine des phénomènes embrassés par ce tableau, la vision d'unité ne s'étend-elle pas au delà encore ?

Nous avons entrevu le cœur de l'atome, et cet ultime réduit de la matière nous est apparu comme un nœud de vibrations planétaires d'une infinie complexité et qui semble bien être l'unique centre émissif de toutes les radiations qui nous enserrent.

L'Univers matériel entier ne serait-il donc qu'une immense manifestation vibratoire.

L'esprit ne recule pas devant cette hypothèse hardie d'unité intégrale de l'Univers matériel ; et dans la contemplation vertigineuse de la vibration universelle, notre regard se reporte sur le petit cartel dont le pendule continue à osciller régulièrement, nous offrant l'image au ralenti de la constitution profonde du monde physique.



BIED-CHARRETON.
DE LA TURBINE A L'ATOME.

Et maintenant, que vient faire en tête de ces dernières notes ce symbole mathématique, $y = \sin x$, qui a, sans nul doute, fait froncer bien des sourcils ?

Cher lecteur, qui jusqu'au bout m'as suivi, veuille bien me pardonner et rester encore quelques instants avec moi, le temps de voir passer le train qui s'annonce par son grondement familier.

Le voici : fixons attentivement le piston de la locomotive qui entraîne les roues motrices par l'intermédiaire de la longue bielle. Le va-et-vient de ce piston est lui aussi une vibration au même titre que l'armée universelle des vibrations que nous venons de passer en revue. Ce mouvement de va-et-vient, les géomètres nous le disent, n'est que la projection horizontale du mouvement circulaire de la roue motrice prise au point où l'attaque la bielle. Nous pouvons nous représenter cette projection comme l'ombre portée sur le sol par une canne que nous faisons tourner dans notre main sous le soleil au zénith. L'ombre vibre sur le sol pendant que la canne tourne. Or, le mouvement de cette ombre, par rapport au mouvement de la canne qui tourne, est défini par l'équation mathématique $y = \sin x$, équation fondamentale du mouvement vibratoire sinusoidal.

Si donc nous avons mis en vedette cette petite formule mathématique, c'est qu'en sa simplicité extrême, cette pure conception de l'esprit représente la loi unique à laquelle sont soumis tous les mouvements vibratoires, par conséquent, la loi fondamentale à laquelle semble se ramener l'Univers physique tout entier.

$$y = \sin x.$$

Domination de l'esprit sur la matière.

FIN

BIED-CHARRETON.
DE LA TURBINE A L'ATOME.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
Energie industrielle. Houille blanche	1
Les principes de Carnot	37
Réalisations modernes	49
La théorie cinétique. Les dessous du code de la nature	77
Les foules moléculaires	103
Le radium. L'anatomie de l'atome	131
Vibrations	177

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

BIED-CHARRETON.
DE LA TURBINE A L'ATOME.

LIBRAIRIE-IMPRIMERIE
GAUTHIER=VILLARS
55, Quai des Grands Augustins, PARIS (6^e)

Tél. DANTON 05-11 et 05-12

R. C. Seine 99506.

=====

Envoi dans toute la France et l'Union postale contre mandat-poste ou valeur sur Paris
(Chèques postaux Paris 29 323.)

Frais de port en sus : France et France d'Outre-Mer, 5 % ; Étranger, 10 %.

Giuseppe BELLUZZO
Professeur ordinaire de Construction des Moteurs thermiques et hydrauliques
au Polytechnicum royal de Milan.

Les Turbines à vapeur

TRAITÉ A L'USAGE DES INGÉNIEURS, DES TECHNICIENS
ET DES ÉLÈVES INGÉNIEURS DES ÉCOLES D'APPLICATION

Traduit de l'italien par JEAN CHEVRIER
ancien Élève de l'École Polytechnique, Licencié ès sciences.

DEUX VOLUMES IN-8 RAISIN (15-16) SE VENDANT SEPARÉMENT :

TOME I

Théorie et Calcul des Turbines à vapeur

Un volume de 367 pages, avec 260 figures dans le texte et planches hors texte : 60 fr.

TOME II

Les Turbines à vapeur

Un volume de 596 pages, avec 490 figures dans le texte et planches hors texte : 80 fr.

BIED-CHARRETON.
DE LA TURBINE A L'ATOME.

LIBRAIRIE-IMPRIMERIE
GAUTHIER=VILLARS
55, Quai des Grands Augustins, PARIS (6^e)

Tél. DANTON 05-11 et 05-12

R. C. Seine 99506.

=====
Envoi dans toute la France et l'Union postale contre mandat-poste ou valeur sur Paris
(Chèques postaux Paris 29 323.)

Frais de port en sus : France et France d'Outre-Mer, 5 % ; Étranger, 10 %.

—————
INSTITUT INTERNATIONAL DE PHYSIQUE SOLVAY
—————

La Structure de la Matière

RAPPORTS ET DISCUSSIONS DU CONSEIL DE PHYSIQUE TENU A
BRUXELLES, DU 27 AU 31 OCTOBRE 1913 SOUS LES AUSPICES DE
L'INSTITUT INTERNATIONAL DE PHYSIQUE SOLVAY, PUBLIÉE PAR LA
COMMISSION ADMINISTRATIVE ET UN DES SECRÉTAIRES DU CONSEIL.

|||||

In-8 (25-16) de xiv-328 pages, avec figures : 40 fr.

|||||

Électrons et Photons

RAPPORTS ET DISCUSSIONS DU CINQUIÈME CONSEIL DE PHYSIQUE,
TENU A BRUXELLES DU 24 AU 29 OCTOBRE 1927, SOUS LES
AUSPICES DE L'INSTITUT INTERNATIONAL DE PHYSIQUE SOLVAY,
PUBLIÉS PAR LA COMMISSION ADMINISTRATIVE DE L'INSTITUT.

|||||

In-8 (25-16) de viii-292 pages, avec figures : 60 fr.

BIED-CHARRETON.
DE LA TURBINE A L'ATOME.

LIBRAIRIE-IMPRIMERIE
GAUTHIER=VILLARS
55, Quai des Grands Augustins, PARIS (6^e)

Tél. DANTON 05-11 et 05-12

R. C. Seine 99506.

=====

Envoi dans toute la France et l'Union postale contre mandat-poste ou valeur sur Paris
(Chèques postaux Paris 29 323.)

Frais de port en sus : France et France d'Outre-Mer, 5 % ; Étranger, 10 %.

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

Les idées modernes
sur la
Constitution de la Matière

Conférences faites en 1912

PAR

E. BAUER, A. BLANC, E. BLOCH, Mme P. CURIE,
A. DEBIERNE, L. DUNOYER, P. LANGEVIN,
J. PERRIN, H. POINCARÉ, P. WEISS

|||||

In-8 (25-16) de iv-372 pages, avec 51 figures : 32 fr.

BIED-CHARRETON.
DE LA TURBINE A L'ATOME.

LIBRAIRIE-IMPRIMERIE
GAUTHIER=VILLARS

55, Quai des Grands Augustins, PARIS (6^e)

Tél. DANTON 05-11 et 05-12

R. C. Seine 99506.

=====

TOUS LES TRAVAUX
DE TYPOGRAPHIE

SCIENTIFIQUE ET COMMERCIALE

CATALOGUES INDUSTRIELS

ÉDITIONS D'ART

TOUS LES TRAVAUX
DE PHOTOGRAVURE

TRAIT, SIMILI, COULEUR

REPRODUCTION D'OUVRAGES ANCIENS
PAR PROCÉDÉ SPÉCIAL

IMPRIMEUR-ÉDITEUR
DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES, DU BUREAU DES LONGITUDES,
DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE. DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS