

L. HOULLEVIGUE

Du laboratoire à l'usine

Le rôle des machines — Le moteur à gaz
Le transport et la distribution de l'énergie
Les Alpes Industrielles
L'électrochimie — L'éclairage par incandescence
La science et les applications du froid
Molécules, Ions, Corpuscules



Librairie Armand Colin

PARIS 5^e, rue de Mézières

Du laboratoire à l'usine

LOUIS HOULLEVIGUE

Professeur à l'Université de Caen.

Du laboratoire à l'usine

LE RÔLE DES MACHINES — LE MOTEUR A GAZ
LE TRANSPORT ET LA DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE
LES ALPES INDUSTRIELLES
L'ÉLECTRO-CHIMIE — L'ÉCLAIRAGE PAR INCANDESCENCE
LA SCIENCE ET LES APPLICATIONS DU FROID
MOLECULES, IONS, CORPUSCULES



PARIS

Librairie Armand Colin

5, rue de Mézières, 5

1904

Tous droits réservés.

PRÉFACE

Les deux associations scientifiques les plus autorisées, en France et en Angleterre, sont sans contredit notre Académie des Sciences et la Royal Society of London ; leur comparaison est intéressante en ce qu'elle marque, avec une netteté parfaite, l'état d'esprit différent des deux peuples au regard des questions scientifiques.

Notre Académie est une institution d'état ; si elle rassemble dans ses rangs les plus hautes compétences scientifiques du pays, elle n'a jamais éprouvé le besoin de s'agréger ce public de connaisseurs éclairés, d' « honnêtes gens, » qui tiennent surtout à la science par l'intérêt qu'ils lui marquent ; elle forme un cénacle un peu fermé, ne communiquant avec l'extérieur que par ses comptes rendus hebdomadaires, dont les communica-

lions scientifiques ne font aucune avance au grand public.

La Société royale, au contraire, réunit dans son sein, avec les savants attirés du Royaume-Uni, un grand nombre de représentants de la haute aristocratie intellectuelle d'Angleterre : institution essentiellement privée, elle est pourtant, grâce à la générosité de ses membres, la plus riche et la plus puissante des associations scientifiques ; et si elle a pour but fondamental de concourir à l'avancement des sciences, elle s'attache aussi fermement à leur diffusion ; par là, elle est devenue un lien entre ceux qui s'intéressent aux sciences et ceux qui les cultivent, et un instrument de haute vulgarisation scientifique. Elle a ainsi créé des habitudes qui datent de plus d'un siècle : tous ceux qui ont, en Angleterre, un nom dans les sciences, tous les hommes qui ont quelque chose à apprendre aux autres hommes, tiennent à honneur de mettre le public au courant, soit de leurs propres découvertes, soit des progrès généraux des sciences. Ils s'ingénient à rendre accessibles les questions les plus ardues ; multipliant les comparaisons, imaginant les

plus ingénieuses expériences, ils ne se tiennent pour quittes que lorsqu'ils se sont fait comprendre de leur auditoire ; ils croient ainsi acquitter une dette envers ce public qui s'est efforcé à les aider dans leurs recherches et à les suivre dans leurs travaux.

Ainsi, la Société Royale a vu paraître dans ses amphithéâtres des hommes tels que Humphrey Davy, Faraday, qui ne croyaient pas se diminuer en vulgarisant leurs découvertes, et même celles des autres. Un de leurs successeurs, Tyndall, fut un merveilleux conférencier, et ses leçons, pleines d'un délicieux humour, ont traversé le détroit, et restent maintenant encore un des plus intéressants ouvrages de physique qu'on puisse lire sans éducation technique préalable.

De nos jours, cette tradition ne s'est pas perdue ; un des plus grands physiciens de tous les temps, Sir William Thomson (aujourd'hui Lord Kelvin) a porté dans ses leçons publiques ¹ un génie si pénétrant, si profond et pourtant si clair, que le lecteur d'aujourd'hui y retrouve l'intérêt passionnant

1. Publiées en France : *Conférences et Allocutions scientifiques*, traduction Lugol.

qu'ont dû éprouver les auditeurs d'hier. D'autres encore, Ramsay, Lodge, s'attachent, par la parole et par leurs écrits, à vulgariser les découvertes récentes et les nouvelles doctrines scientifiques. Inutile d'ajouter qu'avec de tels savants, il ne s'agit pas de cette basse vulgarisation qui rend les choses *vulgaires*, mais d'un degré supérieur de clarification qui les rend accessibles aux hommes de moyenne culture.

Visiblement, la France du XIX^e siècle a vécu avec d'autres idées. Alors que chaque séance de l'Académie française attirait les visiteurs, alors que la presse en reproduisait les comptes rendus, qu'on se plaisait à en causer dans les salons, qu'on suivait même avec intérêt la patiente élaboration du dictionnaire, l'Académie des sciences tenait au contraire ses séances dans la plus grande intimité, on pourrait même dire dans un strict incognito. C'est que le public intelligent et instruit de ce pays-ci jugeait qu'il convient de laisser les questions scientifiques aux savants; d'ailleurs, et pour mieux affermir cette tendance de l'esprit public, l'éducation scientifique donnée au collège semblait, avec son appareil classique de démonstrations et

d'expériences, former un domaine à part, en dehors du monde réel, ayant ses vérités à lui, qui ne sont pas celles de la vie courante, domaine ennuyeux et difficile à parcourir, et sans utilité effective, en dehors des examens.

Mais les choses ont, depuis vingt ans, pris une toute autre allure ; les sciences sont entrées, par leurs applications, au cœur même de la vie. Le laboratoire a débordé dans l'usine, dans la rue, dans nos maisons mêmes. Le public, étonné d'abord, a commencé de se demander ce qu'était cette science au nom de laquelle on transformait la face de la terre ; la science, discrètement, s'est présentée, se recommandant toujours des applications industrielles, comme on se recommande d'un parent riche ou parvenu. Accueillie avec sympathie, elle a fait des efforts pour plaire, non par vanité, mais parce qu'il y allait de l'intérêt commun. Et maintenant, on peut dire qu'elle est reçue pour elle-même, quand on considère avec quel intérêt passionné le public, les journaux, suivent pas à pas des découvertes, comme celle du radium, qui n'ont eu à se recommander d'aucune application pratique.

Ainsi, tout évolue en même temps. Pendant que l'intérêt public commençait à s'éveiller, des hommes avisés jugeaient que l'éducation scientifique, faite jusqu'ici par des procédés surannés, demandait à être rajeunie ; il ne s'agissait pas seulement de faire de nouveaux programmes, mais d'infuser à l'enseignement un esprit tout nouveau, de quitter l'abstraction à outrance, rêve de nos prédécesseurs, pour aller de plus en plus vers le concret, pour montrer les lois naturelles en acte dans la nature même ; l'expérience dira si on y a réussi, et si les générations qui passent aujourd'hui par l'école porteront demain la marque de cette éducation nouvelle qu'on a cherché à leur donner.

Mais il y avait encore quelque chose à changer : l'esprit des maîtres. Résignés à rester en marge de la vie commune, savants et professeurs s'étaient réfugiés dans leur tour d'ivoire ; ils y vivaient ignorés, ignorant aussi certaines choses du monde extérieur, et par contre assez convaincus que la science ne pouvait que s'abaisser à se commettre avec la foule. C'est alors qu'une voix, autorisée entre toutes, leur a montré la route

nouvelle et les a conviés à s'y engager ; à l'appel de M. Liard, ceux qui ont la tâche de distribuer la science ont compris que l'heure était venue d'élargir leur enseignement, que par delà le public restreint de leurs étudiants s'étendait la foule de ceux qui ont besoin de se pénétrer, non des sciences elles-mêmes, mais de l'esprit scientifique : car c'est à cela surtout que la vulgarisation peut être utile ; elle doit faire comprendre les méthodes scientifiques à des cerveaux qui n'en sont pas coutumiers ; elle doit leur montrer comment le labeur des savants combine les données expérimentales pour progresser dans le sens du concret, ou dans celui de l'abstraction. Dans la seconde direction, il atteint des notions de plus en plus générales, tandis que dans la première, il fait concourir à la réalisation d'un objectif déterminé de nombreuses branches des connaissances humaines. Ainsi, pour atteindre ce simple but : préparer du carbure de calcium, et pour procéder d'une manière logique et scientifique, il a fallu faire une application raisonnée des lois de la chimie, de l'électricité et de la chaleur.

Il me semble, qu'envisagée ainsi, la vulgarisation est autre chose qu'un vain amusement, qu'un passe-temps pour les gens oisifs. Je me suis efforcé, dans les pages qui suivent, de lui conserver son caractère éducatif. Sans avoir la prétention d'exposer une vue d'ensemble des théories et des applications scientifiques, j'ai choisi à dessein un nombre restreint d'exemples ; pour chacun d'eux, j'ai essayé de montrer comment l'emploi des méthodes scientifiques, agissant en deux sens opposés, créait d'une part des lois et des idées de plus en plus compréhensives, et d'autre part, substituait dans les applications une rigoureuse logique à l'empirisme des débuts.

Et, en même temps, j'ai souhaité de montrer au lecteur comment la science d'il y a cent ans, petite île isolée en dehors de la vie des peuples, est devenue aujourd'hui « la plus grande science », qui a étendu son autorité sur le monde, depuis le terre à terre de notre existence quotidienne jusqu'aux régions se-reines où pensent les philosophes.

DU LABORATOIRE A L'USINE

LE ROLE DES MACHINES

Le caractère scientifique et industriel de la société moderne s'affirme chaque jour davantage ; sans cesse apparaissent de nouvelles machines, et s'accroissent nos moyens d'action sur la nature ; mais le hasard ou la fantaisie des inventeurs ont-ils, à eux seuls, déterminé cette évolution, ou bien, au contraire, les progrès du machinisme, — comme on dit dans l'argot scientifique, — sont-ils subordonnés à une loi historique, facile à suivre dans le passé et permettant, pour l'avenir, des prévisions vraisemblables ? C'est la seconde hypothèse qui est la vraie, et un coup d'œil rapide sur l'évolution historique du machinisme va nous en fournir la preuve immédiate.

Il est certain que la première machine est née du besoin, pour l'homme, de produire un effort

supérieur à ses propres forces ; en brisant une branche d'arbre pour s'en faire un levier, en utilisant un plan incliné pour monter des pierres, l'homme primitif ne songeait à résoudre qu'un problème, la multiplication de la force. Mais la pratique a dû lui montrer bien vite que si, en appuyant sur un bras de levier, il produisait à l'autre extrémité la force de dix hommes, en revanche le déplacement produit était dix fois moindre que celui du bras moteur, et que cette règle était générale ; autrement dit que ce qu'il gagnait en force, il le perdait en chemin parcouru ; si bien que le produit de ces deux termes, qui sont les éléments du travail, restait constant. Cette propriété se retrouve dans toutes les machines purement mécaniques, dans lesquelles un mouvement est transformé en un autre, quel que soit le but qu'on se propose d'atteindre par cette transformation, quelque compliqués que soient les mécanismes qui la réalisent ; considérons par exemple un moulin hydraulique : il utilise une chute d'eau dont le débit est de mille litres à la seconde, tombant de deux mètres de hauteur ; la *puissance* de cette chute, ou son travail par seconde, sera de deux mille kilogrammètres ; si on l'utilise intégralement à élever des sacs de blé, pesant cent kilos, à dix mètres de hauteur, elle pourra en élever deux à la seconde, et la puissance transmise par les machines sera aussi de deux mille kilogrammè-

tres, c'est-à-dire qu'elle égalera la puissance qui leur a été fournie par la chute.

C'est ainsi qu'en combinant des mécanismes variés, en vue de satisfaire à des besoins distincts, l'homme a pu, accidentellement, reconnaître qu'ils possédaient tous une propriété commune : toutes ces machines ne rendent, sous une autre forme, que la quantité de travail qu'on leur a donnée ; ce sont des *transformateurs d'énergie mécanique*.

Cette propriété, soupçonnée sans doute depuis longtemps, était bien connue de Pascal, qui en a montré l'application à la presse hydraulique dont il est, comme on sait, l'inventeur. Voici, en effet, comment il s'exprime au chapitre II de son *Traité de l'équilibre des liqueurs* : « Si un vaisseau plein d'eau, clos de toutes parts, a deux ouvertures, l'une centuple de l'autre : en mettant à chacune un piston qui lui soit juste, un homme poussant le petit piston égalera la force de cent hommes qui pousseront celui qui est cent fois plus large, et en surmontera quatre-vingt-dix-neuf... D'où il paraît qu'un vaisseau plein d'eau est un nouveau principe de mécanique et une machine nouvelle pour multiplier les forces à tel degré qu'on voudra, puisqu'un homme par ce moyen pourra enlever tel fardeau qu'on lui proposera. Et l'on doit admirer qu'il se rencontre en cette machine nouvelle cet ordre constant qui se trouve en toutes les anciennes, savoir le

levier, le tour, la vis sans fin, etc., qui est que le chemin est augmenté en même proportion que la force. Car il est visible que, comme une des ouvertures est centuple de l'autre, si l'homme qui pousse le petit piston l'enfonçait d'un pouce, il ne repoussait l'autre que de la centième partie seulement. »

Ainsi, les notions si bien précisées par Pascal suffisaient pour faire justice de la fabuleuse machine de O'Keenan, dont l'Amérique, il y a peu d'années, fut émue et devant laquelle il suffisait de jouer du violon pour qu'elle se mît à tourner, engendrant une puissance de plusieurs chevaux ; et pourtant, cette invention connut des admirateurs enthousiastes, elle eut même, ce qui est mieux, des bailleurs de fonds, jusqu'au jour où on découvrit, dissimulés sous le plancher, les moteurs qui entraînaient toute la machine beaucoup plus naturellement que n'aurait pu le faire le son d'un violon, si mélodieux qu'il pût être.

*
* *

1774 : James Watt et son associé Boulton installent dans les mines de Cornouailles leur première machine à vapeur. Certes, la découverte des machines à feu avait été préparée de longue main, par Watt et ses prédécesseurs ; les œuvres comme celle-là ne sont le fait ni d'un jour, ni du hasard, ni du génie d'un seul homme. Mais à

partir de 1774, l'industrie humaine est en possession d'un nouvel et puissant auxiliaire, dont le principe diffère entièrement de celui des machines purement mécaniques employée antérieurement: du travail mécanique est encore produit, mais sans une dépense correspondante de travail. Est-ce à dire cependant que cette énergie mécanique soit engendrée gratuitement? Non, puisqu'il y a dépense correspondante de charbon, c'est-à-dire de chaleur; mais la liaison nécessaire entre ces deux éléments, chaleur dépensée, travail produit, n'est perçue clairement que depuis un demi-siècle.

Il ne faut pas oublier, en effet, que la théorie du phlogistique, de Stahl, a pesé longtemps et lourdement sur la science. Pour elle, la chaleur était d'essence matérielle; c'était elle qui, sous le nom de phlogistique, s'échappait en langues de feu des corps en combustion pour aller se réfugier dans les corps froids et élever leur température. Voici, par exemple, comment s'exprime Sigaud de la Fond, en 1784, dix ans après les premières découvertes de Lavoisier: « Le feu pur, dégagé de tout état de combinaison, paraît un assemblage de particules d'une matière simple, homogène, absolument inaltérable, et toutes les propriétés de cet élément indiquent que ces particules sont infiniment petites et déliées, qu'elles n'ont aucune cohésion sensible entre elles, qu'elles sont mues en toutes

sortes de sens, d'un mouvement continu et rapide qui leur est essentiel... L'extrême ténuité, la mobilité surprenante de ses molécules, se fait voir manifestement par la facilité avec laquelle il pénètre les substances les plus compactes, et par sa tendance à se mettre en équilibre dans tous les corps circonvoisins. » Dans cette doctrine purement matérialiste, il était difficile de concevoir comment le travail mécanique, qui est indépendant de toute notion de masse, puisqu'il ne dépend que d'une force et d'une longueur, pouvait procéder du calorique envisagé comme une substance indestructible.

Pour comprendre ce qui se passe dans la machine à vapeur, et pour déblayer la science d'une vieille théorie, il a fallu l'effort de plusieurs générations de penseurs ; et pourtant, un seul homme aurait suffi à cette tâche, si la vie ne lui avait pas été si étroitement mesurée : c'est Sadi Carnot, le fils du grand conventionnel. Cet homme de génie publia en 1824, à l'âge de trente ans, ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, où sont jetés les fondements d'une science moderne, la thermodynamique. Dans ce livre admirable, il épouse encore, bien qu'à regret, les théories admises de son temps ; pour lui, la production du travail dans les machines à feu est due « non à une consommation réelle de calorique, mais à son transport d'un corps chaud à un corps froid », et il compare

la puissance motrice de la chaleur à celle d'une chute d'eau, : « La puissance motrice d'une chute d'eau, dit-il, dépend de sa hauteur et de la quantité du liquide ; celle de la chaleur dépend aussi de la quantité de calorique employé et de la différence de température des corps entre lesquels se fait l'échange du calorique. » Je ne veux pas indiquer ici comment Carnot a pu déduire de ces principes erronés des conséquences vraies et d'une haute importance, ni rappeler comment il parvint, quelques mois avant sa mort, à la connaissance de la vérité ; celle-ci devait sommeiller vingt ans encore, et n'être réveillée que par les efforts de Mayer, de Joule et de Hirn. Il fallut tout d'abord établir que le calorique n'était pas indestructible, qu'il était réellement détruit dans la machine à vapeur, et c'est un fait aujourd'hui acquis que la chaleur restituée par la vapeur au condenseur, est moindre que la chaleur empruntée au foyer. Mais il y a plus ; on peut, de bien des manières, produire un travail mécanique en dépensant de la chaleur, ou inversement, produire de la chaleur au moyen d'un travail mécanique : dans tous les cas, et quel que soit le procédé employé, *il existe un rapport constant entre les quantités de chaleur et de travail qui se remplacent mutuellement.* Alors, tout s'explique : la chaleur et le travail mécanique, différents d'aspect, sont identiques au fond, ils peuvent se mesurer avec la

même unité ; 425 kilogrammètres peuvent aussi bien élever un litre d'eau à 425 mètres de hauteur, ou échauffer sa température de un degré. Et une comparaison pourra nous faire saisir comment la transformation est possible entre la chaleur et le travail : laissez tomber un poids sur un diapason, le diapason reste, en apparence, immobile, et pourtant il vibre ; chacune de ses parties a pris un mouvement rapide et d'amplitude assez faible pour échapper aux yeux, et le travail fourni par le choc se retrouve en énergie vibratoire ; faites tomber maintenant ce même poids sur un bloc de plomb, le plomb s'échauffe, et nous sommes amenés à penser que l'énergie du choc se retrouve dans les déplacements, assez petits pour être invisibles, de ses particules, et qu'ainsi la chaleur n'est que du travail moléculaire. Avec ce nouvel aspect des choses, toute différence profonde disparaît entre les machines mécaniques et thermiques : les unes, comme les autres, ne font que restituer, sous une autre forme, le travail qu'on leur a fourni ; les unes et les autres sont des transformateurs d'énergie.

*
* *

Mais nous ne sommes qu'au début de notre généralisation ; poursuivons. Avec les débuts du XIX^e siècle, une autre énergie entre dans la vie industrielle des nations, c'est l'énergie chimi-

que. Celle-là aussi est vieille comme le monde, et utilisée depuis Prométhée, puisque toute combustion est une réaction chimique ; mais, pareille à ces pianos qu'on trouve chez des rois nègres et qui restent inutiles parce que personne n'en sait jouer, l'activité des forces chimiques resta inemployée jusqu'à ce que Berthollet, Chevreul et Leblanc la missent au service de la grande industrie. Or, aujourd'hui, il n'y a plus de doutes sur la nature des liens qui unissent les affinités chimiques aux autres énergies ; jetez de l'eau sur la chaux vive, les éléments s'unissent et de la chaleur est dégagée. Inversement, chauffez de la chaux hydratée, la chaux et l'eau se séparent et de la chaleur est absorbée : si bien que les systèmes [chaux hydratée] et [chaux + eau] ne diffèrent que par une certaine quantité de chaleur, autrement dit d'énergie, en plus ou en moins.

Sous quelle forme cette énergie existe-t-elle dans les corps susceptibles de réaction ? Nous l'ignorons encore, mais nous pouvons cependant noter au passage sa propriété caractéristique, qui est de pouvoir se conserver, sans altération, aussi longtemps qu'on le veut : qu'on laisse du charbon en présence de l'air, il y restera indéfiniment et la réaction, c'est-à-dire la transmutation des énergies chimiques en chaleur, n'aura lieu que lorsqu'on l'aura préalablement amorcée : de même qu'un ressort tendu est sus-

ceptible d'effectuer un travail par sa détente, mais ne l'effectuera que lorsqu'on aura retiré le verrou qui le maintenait. Une semblable énergie, qu'on peut ainsi accumuler et conserver pour la dépenser à l'heure voulue, peut être appelée énergie de réserve ; les physiiciens disent qu'elle existe en puissance dans les corps susceptibles de réagir, et l'appellent pour cette raison « énergie potentielle ».

En tous cas, sous cette forme, les corps contiennent une nouvelle forme d'énergie, qui caractérise les éléments en présence, et qui peut se transformer en toutes les autres, et c'est ce dont nous sommes assurés par l'étude de la chimie tout entière. Chaque combustion nous présente la transformation de cette énergie en chaleur ; c'est la plus ordinaire, et en se plaçant à ce point de vue, on peut dire que le nombre des combustibles est illimité. Un des derniers venus, et non le moins bon, est l'aluminium, qu'on emploie couramment aujourd'hui, mélangé à des oxydes qui lui fournissent l'oxygène nécessaire à sa combustion, pour obtenir les températures les plus élevées ; et c'est grâce à ces foyers où on brûle l'aluminium que la métallurgie de certains métaux, comme le chrome et le manganèse, est devenue industrielle ; c'est aussi, dit-on, en chargeant leurs obus de ce mélange d'aluminium et d'oxydes que les Américains ont pu enflammer si promptement les malheureuses flottes espa-

gnoles de Cuba et des Philippines ; nous voilà donc dotés d'un nouveau combustible que nous fabriquons nous-mêmes en communiquant à l'alumine une énergie qui se retrouve lors de la recombinaison de ses atomes séparés.

Mais la chaleur n'est pas le résultat nécessaire et unique d'une réaction chimique. Quand un kilogramme d'essence de pétrole brûle dans un fourneau, cette combustion fournit exclusivement de la chaleur, et elle en dégage assez pour échauffer 11.000 litres d'eau de un degré : soit 11.000 calories ou $11.000 \times 425 = 4.675.000$ kilogrammètres. Mais si le mélange d'essence vaporisée et d'air brûle dans un cylindre muni d'un piston, celui-ci se trouve poussé en avant, et du travail mécanique est engendré : c'est le principe des moteurs à essence employés pour les automobiles ; un moteur du type courant pourra ainsi, en brûlant un kilogramme d'essence, produire 900.000 kilogrammètres de travail mécanique, mais la chaleur libérée par la réaction chimique est alors moindre, elle n'est plus que de $4.675.000 - 900.000 = 3.775.000$ kilogrammètres ; si bien que l'énergie totale contenue sous forme d'affinité chimique s'est encore transformée tout entière, et sans déperdition, une part en chaleur, l'autre en travail mécanique.

C'est une satisfaction pour l'esprit de constater que l'énergie se retrouve tout entière après

cette transformation comme après toutes les autres ; de même, celui qui taille un diamant brut peut vérifier que le poids de la pierre taillée et des déchets reproduit le poids de la pierre primitive, mais il y a pour le joaillier une satisfaction beaucoup plus grande à tirer de la gemme première la pierre taillée la plus grosse possible, puisque le déchet est sans valeur ; et c'est un côté pratique de la question qui se présente aussi pour les transformations d'énergie : Dans notre moteur à pétrole, nous avons dépensé 4.675.000 kilogrammètres en brûlant l'essence, et nous n'en avons récupéré que 900.000 sous forme de travail ; tout le reste, toute la chaleur qui s'est dégagée en surplus, est un déchet inutilisable. Le quotient $\frac{900.000}{4.675.000} = 0,20$ environ,

représente donc la fraction d'énergie *utile* récupérée dans la transformation, autrement dit le *rendement* du moteur en travail mécanique : un cinquième seulement de l'énergie fournie au moteur nous est restituée sous une forme utilisable, tout le reste est pratiquement perdu. Et cette règle est générale : quand on nous dit que le rendement mécanique d'une locomotive est de 4 p. 100, on nous apprend que les 96 centièmes de la chaleur fournie au foyer y sont dépensés en pure perte, et que les 4 centièmes restants sont seuls transformés en travail mécanique. Telle est la restriction que nous devons ajouter

aux principes généraux de la science, si nous voulons comparer entre elles les différentes machines : Toutes sont des serviteurs honnêtes, en ce sens qu'elles ne gardent rien pour elles, et restituent intégralement le travail qu'on leur a fourni ; mais elles sont des ouvriers plus ou moins habiles suivant qu'elles restituent, sous forme utile, une fraction plus ou moins grande de ce travail.

*
*
*

A côté de ces vieux serviteurs, un autre, adolescent encore, mais singulièrement alerte, a pris sa place dans l'atelier ; ses précepteurs, Volta, Faraday, Ampère, ont mis près d'un siècle à le former ; il n'y a guère plus de vingt ans que Gramme et Edison l'ont lancé dans la vie industrielle, et chacun sait quelle place, déjà, il y a prise. Nous ne savons pas, au fond, ce qu'est l'électricité, et peut-être sommes-nous condamnés à l'ignorer toujours ; c'est un lutteur masqué, a-t-on dit. Peu nous importe, après tout, puisque nous nous en sommes rendus maîtres et que nous savons l'employer à notre bénéfice ; mais ce qu'il faut voir clairement, c'est qu'en produisant le courant électrique, l'humanité s'est annexé une forme nouvelle de l'énergie, transmutable en toutes les autres et mesurable, comme elles, en kilogrammètres ; une expérience

va nous le montrer nettement : plongeons, dans un vase contenant de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, une lame de zinc et une lame de cuivre. Le zinc sera attaqué par l'acide, et les énergies chimiques, transformées exclusivement en chaleur, libèrent ainsi 670 kilogrammètres pour chaque gramme de métal dissous. Réunissons maintenant les deux lames métalliques par un fil de cuivre ; la réaction reste la même, les mêmes énergies chimiques sont transformées, et pourtant, il n'apparaît plus autant de chaleur : cent kilogrammètres, par exemple, manquent à l'appel. Est-ce à dire qu'ils aient disparu sans compensation ? Non, car dans le fil qui réunit les deux lames, apparaît maintenant une forme nouvelle de l'énergie, l'électricité, et en quantité rigoureusement équivalente à ce que nous trouvons en moins comme chaleur ; et cette électricité peut à son tour se transformer en travail mécanique, en faisant tourner une dynamo, ou en chaleur dans une lampe à incandescence.

*
* *

Nous avons donc acquis une idée directrice : semblable à la matière, qui garde sa masse dans toutes ses transformations, l'*Énergie*, c'est-à-dire la capacité du travail qui existe dans les corps, se conserve, identique au fond, à travers tous ses changements de forme. De même qu'une

valeur déterminée peut être représentée par des billets, de l'or, de l'argent ou du billon, une quantité donnée d'énergie peut se trouver sous les formes mécanique, calorifique, chimique ou électrique; et notre esprit peut s'habituer à la reconnaître, sous ces masques divers, et à la suivre dans l'univers comme on suit un fleuve dans son cours: nous la voyons arriver du soleil, sous forme de chaleur rayonnante, convoyée par les vagues incessantes de l'éther; une part met en branle l'atmosphère, vaporise l'eau des mers, des rivières et des lacs qui retombe ensuite sur le flanc des montagnes, engendre en un mot tout le travail mécanique qui apparaît à la surface de notre globe; l'autre part s'emploie en réactions chimiques, en élaborant les tissus animaux et végétaux. C'est dans ces derniers surtout, et dans la houille qui en dérive, qu'elle constitue une vaste réserve d'énergie: semblable aux lacs où s'endort l'eau d'un fleuve, elle attend une occasion favorable, qui ne lui manquera pas dans le cours des siècles, pour retourner dans le courant de cette circulation générale de l'énergie. Puis, finalement, tout ce qui nous était venu du soleil s'en retourne aux espaces planétaires, encore sous forme de vagues de l'éther, aussi rapides mais moins serrées, plus écartées les unes des autres; de telle sorte qu'on peut envisager le système solaire tout entier comme une vaste machine thermique dont le

foyer est le soleil, qui a pour réfrigérant les espaces planétaires, et qui engendre du travail mécanique en utilisant une chute de température de plusieurs milliers de degrés.

*
* *

Ainsi, l'indestructibilité de l'énergie paraît être, dans les sciences qui se transforment perpétuellement, une de ces vérités que le temps n'atteint pas, comme il a respecté l'autre grand principe, créé il y a cent ans par le génie de Lavoisier, de l'indestructibilité de la matière.

Je sais bien qu'au moment même où la science paraissait avoir acquis dans les deux principes une base inébranlable, la découverte des étonnantes propriétés du radium a semblé à quelques-uns devoir remettre tout en question. Nous en reparlerons plus loin ; dès à présent, nous pouvons affirmer qu'en l'état actuel des faits connus, rien n'autorise à dire que le radium est une source permanente et indéfinie d'énergie. Ce n'est pas parce que quelques points restent à éclaircir dans une découverte toute récente, qu'on a le droit d'abandonner les conclusions d'un effort scientifique de plusieurs siècles, qui nous a montré le mouvement perpétuel comme une chimère. Mais, en admettant même qu'il faille ultérieurement modifier nos idées sur la matière et sur l'énergie, les lois acquises par une longue

expérience, vérifiées sur d'innombrables exemples, subsisteraient encore avec une exactitude amplement suffisante pour que ce que nous avons dit subsiste intégralement. Nous pouvons donc, sans crainte ni arrière-pensée, asseoir et ancrer dans notre esprit les notions qui précèdent, avant de considérer les choses sous un autre aspect.

Nous savons que la vie est faite de l'échange incessant des énergies, réalisé dans la nature ou par les machines ; mais cet échange, s'il est toujours possible en théorie, souffre dans la pratique des difficultés inégales suivant les cas ; il existe à ce point de vue, des différences profondes entre les différentes formes de l'énergie ; je m'efforcerai de les faire ressortir pour deux seulement d'entre elles, la chaleur et l'électricité.

Les grandes industries chimiques, fabrication de la soude, du chlore, métallurgie, nous offrent de nombreux exemples de réactions chimiques réalisées par l'emploi de la chaleur. Choisissons en une, très simple, au moins dans ses grandes lignes : pour fabriquer un kilogramme de fer, il faut dépenser en moyenne, un kilogramme de coke dans le haut fourneau pour transformer le minerai en fonte, et un kilogramme de houille dans le four à puddler pour amener cette fonte à l'état de fer : soit environ 15 millions de calories qui représentent, pour ces deux opérations, la dépense de chaleur effectuée. En retour, le fer

obtenu représente, comme énergie chimique disponible, celle qu'on peut tirer de sa combustion dans l'air, environ 4.700.000 calories ; le rendement de cette opération, c'est-à-dire le rapport de l'énergie chimique récupérée à l'énergie calorifique dépensée, est $\frac{4.700.000}{45.000.000} = 0,11$: voici

donc une opération détestable au point de vue économique, puisque les neuf dixièmes de l'énergie ont été dépensés en pure perte, et pourtant il s'agit d'une fabrication réalisée sur une grande échelle, et qui a subi, depuis de longues années, toute une série de perfectionnements ; et nous voyons aussi, sans calcul, que des deux opérations successives que comporte la fabrication du fer, la seconde correspond à un vrai gaspillage d'énergie, la transformation de la fonte en fer ne devant, en théorie, comporter qu'une dépense imperceptible.

Il n'en va pas autrement quand on cherche à transformer la chaleur en travail ; la machine à vapeur, en dépit de la perfection mécanique où l'ont amené cent cinquante ans d'efforts, ne dépasse guère les rendements de 15 p. 100 : sur dix kilogrammes de houille qui passent dans le foyer, huit et demi ne servent qu'à échauffer l'air ambiant ou l'eau du condenseur ; et la théorie de ces machines, telle que nous l'a léguée Sadi-Carnot, ne nous laisse même pas l'espoir d'arriver jamais à des rendements suffisants : si

bien que, n'était le prix extrêmement bas de l'énergie calorifique fournie par le charbon, les moteurs thermiques ne seraient plus depuis longtemps que des curiosités de laboratoire.

Nous aurions encore bien moins de succès si nous voulions transformer directement la chaleur en électricité, puisque les appareils actuellement réalisés pour cet usage, les piles thermo-électriques, n'ont pas un rendement supérieur à $\frac{1}{2}$

p. 100. Ainsi, de quelque côté que nous nous tournions, nous n'arrivons pas à changer, d'une façon économique, la chaleur en une autre énergie ; elle est comme ces pièces démonétisées dont on ne peut jamais tirer qu'une minime fraction de leur valeur nominale ; elle est une forme inférieure, *dégradée* de l'énergie.

Et pourtant, c'est à cette forme dégradée qu'aboutissent finalement tous nos efforts et toutes les transformations naturelles. Les courants électriques produisent inévitablement des dégagements de chaleur. Les frottements, les chocs, transforment aussi en chaleur le travail mécanique transmis dans nos machines. Les réactions chimiques dégagent, pour la plupart, de la chaleur. Ainsi, ce déchet, cette poussière d'énergie qu'est le calorique va sans cesse s'accumulant par l'usure de la grande machine de l'Univers ; et cette poussière elle-même se transforme incessamment en une poussière plus fine, car il y a

des degrés dans la dégradation ; la chaleur rayonnée par une coulée d'acier fondu n'est pas identique à celle qui est émise par un bloc de glace ; entre toutes ces variétés d'énergie calorifique, il y a des échanges incessants dont le sens général est la destruction des énergies à haute température.

Si les physiciens d'aujourd'hui affichent pour la chaleur le dédain dont je viens d'indiquer les raisons, c'est apparemment qu'ils ont mieux à nous présenter et, de fait, il semble bien que l'électricité, leur dernière création, soit la forme supérieure et perfectionnée de l'énergie. Sa malléabilité, la souplesse avec laquelle elle se prête à toutes les transformations, font d'elle l'agent, chaque jour plus indispensable, le factotum de la vie industrielle. C'est là un fait dont nous sommes tous témoins et qui n'a pas besoin de longues démonstrations ; je veux seulement montrer comment cette supériorité de l'agent électrique se manifeste au point de vue économique.

On sait que de nombreuses réactions chimiques se font actuellement avec le concours de l'électricité : raffinage du cuivre, préparation de l'aluminium, de la soude, des chlorures, des chlorates, du carbure de calcium, etc. ; si bien que l'antique chimie industrielle recule chaque jour devant les progrès de l'électrochimie. Dans nombre de ces réactions, la transformation des énergies se fait avec un assez faible déchet :

pour faire un kilogramme d'aluminium, en électrolysant l'alumine, il faut actuellement dix millions de kilogrammètres. La combustion de l'aluminium en peut restituer trois millions ; le rendement de la transformation est donc 3 dixièmes, et il s'agit d'une fabrication qui n'existait pas il y a vingt-cinq ans. Aussi dans ces transformations, qui sont encore aux débuts de leur application industrielle, une large marge subsiste encore pour les améliorations ; mais il en est d'autres où la perfection est presque acquise. La dynamo, qui réalise la transformation de l'énergie électrique en travail mécanique, ou la transformation inverse, est à l'heure présente tellement accomplie que son rendement, voisin de 60 à 70 p. 100 pour les petits moteurs, s'élève pour les grandes machines jusqu'à 97 p. 100. Le déchet n'est plus que de 3 p. 100, et on peut admirer sans restrictions des intermédiaires qui réclament un aussi modique courtage ; aussi, quand on pénètre dans l'usine moderne et qu'on y voit ces moteurs électriques qui font, discrètement et sans bruit, leur office, on sent que par eux les forces naturelles ont été vraiment domptées et domestiquées, tandis que la vieille usine, crachant le feu et la fumée, où le sol tremble, où l'air retentit du bruit des machines, des arbres et des courroies, laisse l'impression que les forces naturelles luttent encore avec l'homme qui les utilise, et qu'elles résistent à un joug mal assujéti.

Cette docilité de l'agent électrique se manifeste tout aussi nettement dans la facilité avec laquelle on transforme les uns dans les autres les différents types de courants. Le courant continu peut se transformer en courant alternatif, ou inversement; d'autre part, la puissance d'un courant est, comme celle d'un cours d'eau, le produit de deux termes, son débit, évalué en ampères, et sa hauteur de chute, ou tension, mesurée en volts, de telle sorte qu'on peut modifier un courant sans toucher à son énergie, en lui donnant une tension cent fois, mille fois plus grande, à condition de réduire son débit dans le même rapport; et cette modification se réalise couramment, comme la précédente, avec des rendements voisins de 97 p. 100. Aussi l'industrie nous offre-t-elle, à chaque instant, des exemples de ces transformations: aux chutes du Niagara, le courant engendré est alternatif sous une tension de 2.500 volts. 500 ampères en sont dérivés aux usines d'aluminium de la Pittsburg Reduction Company; là, ils sont transformés en courant alternatif de bas voltage (115 volts) et de grand débit (40.000 ampères): puis de nouveaux transformateurs en font du courant continu, utilisé par l'électrolyse, sous une tension de 160 volts et avec une intensité de 7.000 ampères, et ces multiples changements n'entraînent pas une perte totale de 10 p. 100.

On pourrait multiplier les exemples de sem-

blables transformations, mais c'en est assez sur ce sujet, et nous comprenons maintenant comment l'électricité est d'abord, l'intermédiaire obligé entre toutes les modalités de l'énergie, et représente en outre cette énergie sous un forme *transportable et divisible*.

* * *

Mesurons maintenant du regard le chemin parcouru : nous avons établi entre toutes les machines, quelles qu'elles soient, un lien résultant de la communauté de leurs fonctions, puisqu'elles sont toutes des transformateurs d'énergie ; nous avons montré qu'en dépit de cette analogie, il existe entre elles de profondes différences au point de vue économique, puisque les unes sont de bons, les autres de mauvais ouvriers ; enfin nous avons indiqué l'ordre historique dans lequel s'est effectuée l'évolution du machinisme dans l'humanité, et par l'humanité. Il nous reste maintenant à voir, inversement, quelle a été la réaction de la machine sur l'homme, comment et dans quel sens elle a modifié notre état social ; ce que nous avons dit jusqu'ici va rendre aisée notre tâche, en nous permettant de diviser l'évolution humaine en plusieurs ères distinctes.

Dans la première, dont l'existence est assurée sans que nous ayons à son égard aucun renseignement, l'homme n'avait encore inventé ni le

feu, ni la plus simple des machines ; semblable en cela aux animaux qui l'entouraient, il ne pouvait compter que sur ses bras pour repousser ses adversaires, que sur la rapidité de sa course pour gagner sa nourriture, que sur la force de ses mâchoires pour briser les os de ses victimes et en sucer la moelle ; il était à lui-même son unique machine, machine admirable assurément, mais qu'on ne peut pas juger au même point de vue que les autres sans une grave injustice, puisqu'elle est destinée, non à produire une transformation déterminée de l'énergie, mais à les produire toutes suivant les nécessités de la vie ; et de fait, dans la machine vivante, l'énergie chimique empruntée sous forme d'aliments, est utilisée à produire simultanément de la chaleur, des réactions chimiques, du travail mécanique, voire même de l'énergie électrique dont la présence a été sûrement constatée sans que son rôle ait encore été défini. Dans ce fouillis de transformations, il est difficile de fixer avec rigueur la part afférente à chacune d'elles, autrement dit, d'écrire l'équation des énergies. Tout ce qu'on peut dire, c'est qu'envisagée exclusivement comme productrice de travail mécanique, la machine vivante est d'un rendement peu élevé : des expériences récemment effectuées en Amérique, l'ont fixé aux environs de 7 p. 100¹. La

1. Le lecteur aimera peut-être à se rendre compte, avec quelque précision, des expériences d'Atwater et Rosa, aux-

raison de cette infériorité tient d'abord à ce que la machine humaine doit fournir abondamment d'autres énergies, entre autres de la chaleur, et ensuite à la loi de nutrition : imposée à tous les tissus vivants, cette loi exige leur continuité, et bannit par là-même tout mouvement de rotation continu ; seul, le mouvement alternatif est possible, avec tout le cortège d'énergies perdues qu'il entraîne avec lui ; car il est clair que le roulement est plus économique que la marche, et

quelles il est fait ici allusion. L'homme qui servait de sujet était enfermé dans une chambre hermétiquement close ; tous ses aliments solides, liquides et gazeux étaient soigneusement dosés, de telle sorte qu'on pût mesurer la somme des énergies apportées de ce chef ; on pouvait également doser en énergie tout ce qui était dépensé sous forme de chaleur ou de sécrétions et apprécier, par l'augmentation de poids du sujet ce qu'il avait mis en réserve.

Le sujet étant maintenu en repos, le bilan quotidien s'exprimait par les nombres suivants :

Energie absorbée par les aliments.	2 717 calories	
Energie dépensée en chaleur.	2 275 calories	} 2 735 —
— en sécrétions	320 —	
Energie accumulée sous forme de graisse.	140 —	

On voit donc que l'équation des énergies, qui s'écrirait :
Energie absorbée = Energie dépensée + Energie accumulée
se trouve vérifiée avec une remarquable exactitude.

Dans d'autres expériences, le sujet était astreint à produire du travail mécanique : pendant huit heures par jour, il mettait en mouvement un bicycle stationnaire dont la rotation entraînait une dynamo, qui entretenait elle-même une lampe à incandescence ; le travail musculaire était alors mesurable sous forme d'énergie calorifique ; il atteignait 256 calories, tandis que l'entretien de la vie, dans le même temps, exigeait 3 726 calories ; le rendement mécanique de la machine humaine avait donc pour expression $\frac{256}{3\ 726} = 0,07$.

que le mouvement de l'hélice d'un navire résout mieux que ne le fait la nageoire du poisson, le problème de la locomotion aquatique.

*
* *

Mais si la machine vivante emporte avec elle le poids de ces fatalités, l'effort de l'humanité depuis des siècles a tendu à l'en alléger; on n'a pas tardé, sans doute, à trouver les propriétés du levier, du coin, du plan incliné, et à en faire l'application. Progressivement apparurent des mécanismes plus compliqués, les balistes et les catapultes pour la guerre, le treuil et le moufle pour les constructions, le métier à tisser, et tant d'autres : alors, un changement profond s'opéra dans les conditions de la vie humaine; auparavant, la vie d'un homme ressemblait en tout à celle d'un autre homme ; tous s'occupaient semblablement à la chasse, la pêche, la guerre, à construire leur hutte, à dépecer les bêtes pour se couvrir de leur toison. Toutes les cellules étaient semblables dans cette humanité primitive ; maintenant, il n'en est plus de même, chaque cellule s'est différenciée pour une fonction spéciale; il y a des tisserands, des forgerons, des soldats, voire même des rentiers. L'humanité est entrée dans l'ère des métiers ; chacun est nécessaire aux autres, et a besoin d'eux ; une cohésion s'est in-

roduite, qui a transformé les troupeaux humains en sociétés.

*
**

Toutefois, la complication organique du corps social est loin d'avoir atteint son entier développement. Les cellules de même fonction sont indépendantes les unes des autres, elles ne sont pas réunies en un tissu pour concourir synergiquement, et sous une direction unique, à un but d'ensemble. L'artisan qui tisse sa toile dans un village est indépendant de celui qui la tisse au village voisin, chacun travaille pour son compte et forme avec son métier un tout complet.

Mais alors interviennent les causes formatrices dont Lamarck et Darwin ont signalé l'action sur les espèces, et qui agissent aussi visiblement sur les sociétés. La plus active est la lutte pour la vie, ou la concurrence économique. Par elles cet accident, qui est la découverte de James Watt, au lieu de laisser dans les sociétés une trace passagère, les fixe pour un temps dans une forme nouvelle qui dure encore aujourd'hui. L'humanité entre dans l'ère de *la machine à vapeur*. Pour bien comprendre les conséquences qui dérivent de l'emploi généralisé de ces moteurs, il convient de faire les remarques suivantes :

Tout d'abord, les gîtes houillers exploitables

sont, en moyenne, rares et de faible étendue ; c'est ainsi qu'ils ne recouvrent, en France comme en Allemagne, que les six millièmes de la surface totale du territoire, que 33 millièmes en Belgique, 47 millièmes pour les Iles Britanniques, 50 millièmes pour les Etats-Unis, ces trois derniers étant de beaucoup mieux partagés que les autres pays. C'est sur ces gisements, ou dans leur voisinage immédiat que l'énergie sera au plus bas prix. Voilà des régions favorisées, où l'industrie aura tendance à se concentrer ; d'autres causes encore interviendront, comme les voies commerciales qui facilitent l'apport des matières premières ou l'écoulement des produits fabriqués. Ces conditions naturelles auront pour effet de localiser l'activité industrielle en des régions peu étendues, comme les bassins houillers de la Loire et du Nord, le Devonshire, la Pensylvanie, pays noirs et tristes malgré leur vie prodigieusement active, pays malheureux malgré leurs richesses.

Mais dans cette concentration géographique, une concentration plus grande encore va s'effectuer, née d'une troisième cause qu'il faut maintenant signaler. La machine à vapeur n'est économique que pour les grandes puissances. Le rendement en travail d'une machine de cent chevaux pourra atteindre 48 p. 100, tandis que celui d'une machine de 5 chevaux n'en dépasse pas 8, et qu'on n'obtient plus, pour des puis-

sances inférieures à celle-là, que des rendements dérisoires. Et alors la loi fatale de la lutte pour la vie fait son office, les gros mangent les petits ; sur les ruines de la petite usine ou de l'atelier s'élève la grande usine, où des centaines d'ouvriers, conduits militairement, mènent leur dur labeur dans l'espace que peut desservir le moteur : espace nécessairement très limité, puisque les courroies et les arbres de transmission absorbent inutilement une fraction considérable de l'énergie qui leur est confiée ; adieu donc, les moulins à vent ou à eau, si pittoresquement campés sur nos collines ou nos rivières ; la grande minoterie en a eu raison. Adieu aussi, l'ancien métier à tisser, l'atelier de famille, qui nourrissait tant d'artisans. Ceux qui subsistent encore sont une rareté et paraissent une anomalie ; les canuts de la Croix-Rousse, si jaloux de leur indépendance, ont été pour la plupart obligés de s'embrigader dans les usines ; il ne reste plus à Lyon que 11.000 métiers à bras, contre 25.000 métiers mécaniques, installés pour la plupart dans de grandes fabriques ; et je cite là une des rares industries où le travail individuel ait encore pu se maintenir.

Ainsi, la machine à vapeur a créé, sous sa forme la plus cruelle, la centralisation industrielle. C'est elle qui est, pour une grande part, responsable de la dépopulation des campagnes, de la surproduction industrielle et des chômages qui

en dérivent, des grèves, de la lutte des classes ; c'est à cause d'elle que, sous le masque de leur prospérité matérielle, les sociétés modernes portent la lèpre de tant de misères. Et pourtant, si nous laissons de côté toute question sentimentale, nous sommes forcés de reconnaître que cette évolution, d'ailleurs fatale, constitue un progrès, c'est-à-dire une évolution vers une forme supérieure. La différenciation des éléments est poussée maintenant à son extrême limite. Une épingle, pour être fabriquée, passe par les mains de vingt-deux ouvriers dont chacun doit effectuer un nombre délimité d'opérations simples et toujours identiques ; mais aussi dans cette spécialisation à outrance, on demande tout aux bras de l'ouvrier, rien à son cerveau ; la pensée et la réflexion sont localisées dans d'autres individus ; et c'est ainsi que les sociétés humaines se calquent de plus en plus sur les organismes vivants du type supérieur.

On aurait pu, il y a trente ans, penser qu'elles étaient fixées pour longtemps dans cette forme nouvelle créée par la machine à vapeur ; aujourd'hui, cette croyance n'est plus permise, et il est visible que nous évoluons chaque jour plus rapidement vers un nouveau type social : l'ère de l'électricité commence.



L'électricité a pour caractère, nous l'avons dit, de représenter l'énergie sous une forme transportable et divisible; c'est la cause de son rôle social. Lorsqu'Hippolyte Fontaine montrait à l'Exposition de Vienne, en 1873, la réversibilité des dynamos; lorsque Desprez, en 1882, amenait de Miesbach à l'Exposition de Munich, sur un trajet de 57 kilomètres, la force de plusieurs chevaux, l'idée de transport électrique de la force germait, considérée par beaucoup comme sans valeur industrielle; elle a atteint sa pleine maturité grâce à l'emploi des courants alternatifs, qui se prêtent tout naturellement au surcroît de tension moyennant lequel le transport peut s'effectuer avec économie¹. Et c'est ainsi que cent cinquante mille chevaux vapeur, empruntés à l'énergie des torrents alpins, descendent maintenant jusqu'aux vallées du Dauphiné, et que le courant du Rhône offre annuellement aux ateliers lyonnais autant de force que pourraient en fournir soixante mille tonnes de houille. Et si les

1. N'est-ce pas ici le lieu de rappeler que Gaulard, l'inventeur génial du transformateur statique, grâce auquel ces variations de tension sont réalisées automatiquement et presque sans perte, est mort en 1894, jeune encore, et dans une profonde misère; il a fallu une souscription publique pour assurer à ses restes un dernier asile, et pourtant, que de fortunes ont été réalisées grâce à son invention!

procédés actuels ne permettent guère de transporter économiquement l'énergie à plus de cent cinquante kilomètres, rien n'autorise à croire que ce soit une limite infranchissable. Ainsi, l'électricité permet déjà une dilatation considérable des régions industrielles; et de fait, actuellement, de plusieurs centres miniers rayonnent des canalisations électriques qui vont porter, à de grandes distances, l'énergie extraite des entrailles du sol.

Mais il y a plus. La houille ne reste plus le seul fournisseur de la force, et le monopole de la machine à vapeur subit l'attaque d'une rude concurrence. Dans tous les pays de montagne, les installations hydro-électriques se multiplient; la Suisse, les Alpes françaises et italiennes, la Norvège, l'Ecosse entrent de ce fait dans la zone de la grande industrie. On peut se faire une idée de l'appoint que les chutes d'eau viennent donner à la puissance industrielle, en pensant que la chute du Niagara produit à elle seule la dixième partie de la puissance mécanique que pourraient fournir toutes les mines de houille exploitées actuellement sur le globe, et que les torrents des Alpes françaises mettent en jeu une puissance presque égale. Ainsi, la houille blanche des glaciers entre en concurrence avec la houille noire des centres miniers, et toutes deux, aidées par le transport électrique de la force, mettent de larges territoires en possession de ces conditions

industrielles favorables, qui restaient jusqu'alors le monopole de régions trop restreintes.

Mais, dans ces territoires eux-mêmes, une autre décentralisation peut se faire, et commence déjà à se produire sous nos yeux. Par l'électricité, l'énergie peut se diviser jusqu'à l'infini, et c'est la cause de cette nouvelle transformation. Les plus petits métiers, machines à coudre, tours, métiers à tisser, qui n'absorbent souvent qu'un tiers ou un quart de cheval peuvent être mus électriquement dans des conditions économiques. On conçoit par là qu'il soit possible de produire la force de la manière la moins coûteuse, à l'aide de grands moteurs hydrauliques ou thermiques, de la transporter dans la région où elle doit être utilisée, et là, de la répartir entre de nombreux ateliers dont chacun exige pour son compte une très minime puissance; et ces multiples transformations, étendues sur un rayon de plusieurs dizaines de kilomètres n'entraînent pas une plus grande déperdition que, dans l'espace restreint d'une usine, les transmissions par arbre de couche et par courroies.

Ainsi, par l'électricité, l'usine se dilate, elle peut englober toute la superficie d'une commune, voire d'une ville; le téléphone aidant, l'ouvrier reste encore sous la surveillance, sous la direction du chef, et pourtant il se sent plus libre, il est chez lui, et échappe aux promiscuités de

toutes sortes qu'entraîne l'entassement des grands ateliers. Et on voit clairement qu'il ne s'agit pas ici d'un retour en arrière, à la cellule indépendante d'autrefois, puisqu'il y a encore, comme dans l'usine, coordination et subordination, puisque l'être social a complété et étendu le système nerveux qui assure l'unité de l'ensemble ; pourtant le lien est devenu plus souple et plus élastique, par là plus aisé à supporter.

L'électricité permet d'ailleurs, de cent façons différentes, l'organisation du travail. Ici, c'est l'usine même qui se transforme, sans s'étendre, par l'appareillage électrique appliqué à chaque outil ; là, comme chez les tisserands lyonnais, chaque travailleur reçoit à domicile l'électricité qu'il paie et avec laquelle il actionne ses métiers ; ailleurs encore, comme chez les tourneurs du Jura, une usine se construit, utilisant les puissances hydrauliques disponibles, dans laquelle chaque ouvrier loue une place avec la force nécessaire pour y travailler à son compte. De ces multiples solutions, laquelle l'emportera ? Il est malaisé de le prévoir, mais il est probable que chacune d'elle aura sa place dans le plan de la cité industrielle de l'avenir. Ainsi, depuis que le monopole de la machine à vapeur a disparu, la grande usine n'est plus la seule forme économiquement possible ; il en est d'autres, variables à l'infini suivant les lieux, les conditions et les mœurs, qui peuvent entrer en lutte avec elle.

D'ailleurs, il ne faut pas oublier que l'équilibre social n'est pas déterminé uniquement par les facteurs matériels, mais aussi par les facteurs moraux, et c'est ici qu'intervient à son tour la grande différence entre les sociétés humaines et les autres agrégations vivantes. Nul ne l'a mieux sentie et mieux exprimée que M. Duclaux¹ qui, après avoir indiqué l'analogie qui nous a guidés jusqu'ici entre les êtres vivants et les sociétés, formule la restriction suivante : « Sans doute, il faut éviter de prendre cette société cellulaire pour type d'une société humaine ; mais nous pouvons affirmer d'un autre côté qu'aucune société humaine ne pourra en différer beaucoup, car au fond elle obéit aux mêmes lois, tout en portant au front l'auréole de sympathie, de bonté et de pardon qu'on appelle du beau nom d'humanité. »

Ainsi, nous n'avons pas le droit de regarder en fatalistes l'évolution qui s'accomplit, car la solution à intervenir dépend, pour une part, de notre volonté. Evidemment, la centralisation des grandes usines reste toujours plus favorable à une production économique que celle des petits ateliers, mais elle ne l'est plus à tel point que les facteurs moraux ne puissent intervenir pour égaliser la lutte. Ne faut-il pas tenir compte du temps économisé par l'ouvrier en déplacements, de la suppression possible des grèves, de l'aide mu-

1. E. Duclaux, *Sociologie et Biologie*, *Revue scientifique*, 30 décembre 1899.

tuelle que se prêtent les membres d'une même famille dans le petit atelier, et surtout de l'intérêt que l'ouvrier à ses pièces porte à son travail et qui le fera redoubler d'efforts pour conserver et améliorer sa situation, et produire une somme et une qualité de travail qu'on attendrait en vain de l'ouvrier d'usine, indifférent à sa tâche, et souvent impatient du joug qu'il supporte ? Enfin, n'est-il pas admissible que la société elle-même réagisse, par ses lois ou ses impôts, de manière à favoriser la solution la plus favorable à l'intérêt général ?

Ainsi, après nous être appliqués à montrer, dans cet article, ce qu'il y a de fatal et de scientifique dans notre évolution industrielle, nous arrivons pour conclure à une pensée consolante. Tout en restant subordonnée à des lois générales, qui ne dépendent pas de nous, l'évolution humaine jouit d'un certain degré de liberté ; brusquement, et grâce à l'électricité, cette part de liberté s'accroît, et il dépend de nous d'en user pour nous préparer un avenir meilleur ; c'est pourquoi il convient de saluer l'électricité comme une libératrice.

LE MOTEUR A GAZ



Les hommes du XIX^e siècle ont été témoins d'un bouleversement si profond dans les conditions de la vie économique, qu'ils ont conçu pour la machine à vapeur, cause première de cette transformation, une admiration voisine du fétichisme. Depuis les manuels scolaires jusqu'à la poésie lyrique, c'est un concert de louanges sans restriction ni contre-partie sur la géniale invention de Watt. Il faut pourtant apporter aussi dans ces choses un peu de précision, si l'on veut bien comprendre les transformations qui s'accomplissent sous nos yeux. Comme la nature, l'industrie crée des espèces qui évoluent, s'achèvent et disparaissent; aucune d'elles n'est parfaite ni éternelle. Le monde ancien a connu d'admirables machines, dont aucune n'est plus en usage aujourd'hui, et les piles électriques, vieilles d'un siècle à peine, ont déjà dû céder le pas à des générateurs électriques plus perfectionnés. Tout porte à pen-

ser que nos inventions modernes auront un sort analogue. Déjà la machine à vapeur, parvenue au sommet de sa gloire et à la perfection de ses formes, est assaillie par des espèces plus jeunes, imparfaites encore, mais qu'un progrès incessant amène à des formes plus achevées. C'est un des aspects les plus modernes de cette lutte pour la vie industrielle que nous voudrions montrer ici, en exposant l'état actuel de la concurrence entre le moteur à gaz et la machine à vapeur.

* * *

L'admirable invention de James Watt a connu, pendant la première moitié du xix^e siècle, les jours heureux de la croissance sans arrêt et du progrès sans obstacle. Protagoniste d'un puissant essor industriel, elle profitait par contre-coup de tous les progrès dont elle avait été la cause, et les transformations accomplies dans la métallurgie et l'art de l'ingénieur avaient permis de l'amener, en peu d'années, à une forme très perfectionnée. Depuis les travaux de Stephenson, de Hirn, de Corliss, il ne restait plus grand'chose à faire, et les successeurs n'ont pu que retoucher dans les détails l'œuvre des maîtres. Aussi la machine à vapeur du xx^e siècle ne diffère-t-elle de celle de 1860 que par quelques points : application méthodique de la détente dans les machines à multiple expansion, pour

permettre une meilleure utilisation de la pression de la vapeur ; augmentation progressive de la pression dans les chaudières jusqu'à douze atmosphères, pour obtenir plus de puissance avec des machines de moindre encombrement ; surchauffe de la vapeur avant l'arrivée dans le cylindre pour éviter la condensation d'eau dans le corps de pompe, et, pour le même objet, emploi d'une chemise protectrice de vapeur autour du cylindre ; remplacement des tiroirs par des soupapes ou autres mécanismes permettant une distribution plus rationnelle de la vapeur ; précision de plus en plus grande apportée dans la confection de toutes les pièces, et dans le choix des matériaux : telles sont, en raccourci, les principales modifications qui ont porté, depuis quarante ans, la machine à vapeur à un point d'achèvement tel qu'il n'y a plus grand'chose à attendre de l'avenir.

Voyons pourtant ce que vaut cette machine que tous les spécialistes s'accordent à déclarer si près de la perfection. Certes, il n'y a rien à lui reprocher au point de vue de la sécurité et de la régularité de son fonctionnement ; c'est un admirable outil qui ne fait jamais grève et qui, surveillé et entretenu comme il convient, fournit sans mécompte le travail attendu. On a su lui donner diverses formes, machines d'atelier, machines marines, locomobiles, exactement appropriées aux différents objets du labour indus-

triel. Et pourtant, elle présente deux grands, deux irréparables défauts.

En premier lieu, si elle convient à un travail continu, ou du moins sans arrêts fréquents, il en va tout autrement pour nombre de services qui exigent un effort intermittent ; dans certains ateliers, le travail est interrompu trois, et souvent quatre fois par jour ; il en est d'autres où l'usage d'une force motrice n'est requis qu'à intervalles irréguliers, et où cette force doit être immédiatement disponible ; la manœuvre des ponts tournants, des portes d'écluses, des grues et autres appareils employés dans les ports et sur les canaux, n'exige souvent que deux ou trois heures de travail effectif par journée. Or, la production de la vapeur dans les chaudières n'est économique que si elle est continue ; il faut allumer les foyers plusieurs heures avant la mise en service, et, à l'extinction des feux, tout le charbon qui brûle sur les grilles est perdu, comme aussi la chaleur employée pour échauffer l'eau, les chaudières et leur bâti. Ainsi, chaque mise en service coûte, en moyenne, autant que trois heures de travail continu ; qu'on ajoute à ce surcroît de dépense le temps perdu, et l'impossibilité de faire face à une demande imprévue d'énergie, et on comprendra pourquoi on juge meilleur, dans beaucoup de cas, de maintenir les feux allumés en régime continu, plutôt que de procéder à des séries d'allumages et d'extinc-

tions peu pratiques, et d'ailleurs aussi coûteuses. C'est ainsi que nous avons pu voir, à notre grand étonnement, les services d'ouverture des ponts et des écluses de certains ports commandés par des machines à vapeur en service pendant toute la durée de la marée, pour une heure peut-être de travail effectif par journée; seules les habitudes de prudence de notre administration des ponts et chaussées peuvent expliquer, sinon excuser, l'emploi d'une solution aussi coûteuse, acceptable paraît-il pour l'Etat qui paye sans compter, mais qu'aucun industriel ne voudrait adopter pour ses services particuliers. A ce que nous venons de dire, on pourrait objecter qu'il existe des chaudières à vaporisation rapide, où l'eau circule dans des tubes plongés dans le foyer, et qui permettent une production de vapeur beaucoup plus expéditive que les chaudières à grande masse d'eau; dans certains cas, en effet, on a pu mettre les moteurs en marche une demi-heure après l'allumage. Mais une étude plus approfondie de ce mode de vaporisation montre que, tout compte fait, son principal avantage consiste dans une production intensive de vapeur, et que le temps gagné sur la chauffe préalable est compensé par d'autres sources de dépense.

En tous cas, même en admettant que le défaut qui vient d'être signalé ne doive être pris en considération que dans certains cas particuliers,

la machine à vapeur, quel que soit son type, quelles que soient les conditions de son fonctionnement, porte avec elle une tare indélébile : elle est, de tous les transformateurs industriels d'énergie, celui qui a le moindre rendement. La raison primordiale en a été révélée par Sadi-Carnot, un des créateurs de la thermodynamique ; elle réside dans le faible écart qu'on peut réaliser pratiquement entre la température de la chaudière et celle du condenseur. Le théorème de Carnot nous enseigne, en effet, que le rendement d'une machine *parfaite*, autrement dit le rapport de l'énergie restituée sous forme mécanique à l'énergie consommée sous forme calorifique, s'obtient en faisant le quotient de la différence de température entre la chaudière et le condenseur, par la température de la chaudière, augmentée de 273 degrés. Par exemple, pour une machine parfaite fonctionnant à six atmosphères, la température de la chaudière est de 160 degrés, celle du condenseur voisine de 50 degrés, et le rendement théorique s'exprime par le quotient $\frac{160 - 50}{160 + 273} = \frac{1}{4}$ environ. Ainsi, dans une semblable machine, eût-on même réalisé les conditions idéales de fonctionnement imaginées par Carnot, les trois quarts de la chaleur employée seraient perdus pour l'opération industrielle, et se retrouveraient sous forme de chaleur non transformée rejetée dans l'air ou dans l'eau du

condenseur ; seul, le dernier quart trouve son équivalent dans le travail mécanique produit par la machine ! Et si on essayait d'accroître notablement ce rendement en élevant la température de la chaudière, on serait bien vite arrêté par l'augmentation formidable de pression de la vapeur : dans les machines modernes, où la pression atteint douze atmosphères, le rendement théorique ne dépasse pas un tiers, laissant encore les deux tiers de la chaleur dépensés sans bénéfice. Puis n'oublions pas que la machine parfaite imaginée par Carnot n'est qu'un type idéal, pratiquement irréalisable ; dans les moteurs les plus perfectionnés, le travail effectué par la vapeur sur le piston est inférieur d'un quart au moins à ce que nous avons calculé, et ce travail ne parvient pas en entier à l'axe tournant où il est utilisé ; tous les frottements des pièces mobiles de la machine, incomplètement éliminés par le graissage, en absorbent encore 20 p. 100. Une dernière cause, enfin, intervient puissamment pour abaisser le rendement : la chaudière est loin d'absorber toute la chaleur du foyer ; même dans les chaudières à foyer intérieur, où la grille de combustion et les flammes qui s'en échappent sont environnées par la masse d'eau à échauffer, une quantité notable de calorique est perdue et s'échappe par la cheminée sous forme de suie, c'est-à-dire de carbone inutilisé, ou de gaz chauds ; la perte,

très sensible, qui résulte de ce chef, peut être évaluée en moyenne à 30 p. 100.

Qu'on récapitule toutes ces causes de déperdition de la chaleur et du travail mécanique, et on ne sera plus étonné du rendement misérable de ces admirables machines en lesquelles l'humanité d'aujourd'hui contemple le triomphe de son génie. Il est actuellement acquis, à la suite de nombreuses mesures, qu'une machine des meilleurs types, par exemple un moteur à triple expansion de 500 chevaux, consomme en marche industrielle au moins un kilogramme de houille par cheval-heure, c'est-à-dire pour chaque cheval-vapeur de puissance maintenu pendant une heure. Qu'on fasse le compte maintenant, en utilisant la valeur connue du pouvoir calorifique de la houille, et on arrivera à un rendement industriel de 9 à 10 p. 100 ; les neuf dixièmes de la houille ont été brûlés en pure perte ! Et il n'y a aucune illusion à se faire ; ce rendement dérisoire est presque une limite ; on parviendra peut-être à l'accroître de moitié, mais il est invraisemblable qu'on le double jamais ; l'espèce industrielle constituée par la machine à vapeur est aujourd'hui bien près de la perfection de son type.

*
* *

Il y a beau temps qu'on a fait ces constatations, et qu'elles n'ont pas empêché de faire un usage chaque jour plus large de la machine à vapeur ; quels que fussent en effet les défauts de ce transformateur industriel, aucun autre ne permettait d'obtenir à meilleur compte, et surtout dans des conditions comparables de régularité, l'énergie mécanique qui est l'aliment de la vie moderne. Mais voici que le problème change de face, par suite des progrès inouïs réalisés depuis vingt ans par le moteur à gaz.

Moteur à gaz, machine à vapeur, pour beaucoup c'est la même chose, et j'en sais qui y voient cette unique différence, qu'on brûle du gaz dans l'un, et dans l'autre de la houille ; un examen plus attentif aurait déjà pu les convaincre que le moteur à gaz n'a ni foyer visible, ni chaudière, et c'est bien déjà quelque chose. Mais nous devons préciser davantage. Dans cet appareil, un jeu approprié de soupapes introduit dans le cylindre un mélange de gaz combustibles et d'air, qu'enflamme une étincelle électrique ou le contact d'un corps quelconque maintenu à l'incandescence ; la surpression produite par la combustion du gaz pousse le piston dans le cylindre absolument comme, dans le canon, les gaz dégagés par la déflagration de la poudre

chassent devant eux le boulet. Le canon se trouve être, à ce point de vue, l'ancêtre du moteur à gaz, et il est assez singulier qu'une propriété utilisée depuis tant d'années dans les instruments de guerre, ait dû attendre sept siècles avant de trouver son application aux arts de la paix.

La pensée première de cette application appartient à Lebon, l'inventeur du gaz d'éclairage, qui avait pris en 1799 un brevet pour cet objet ; mais ce n'est que soixante ans plus tard que Lenoir établissait une machine capable d'une marche pratique ; et encore l'étape décisive, celle qui sépare l'invention ingénieuse de la machine industrielle, n'était pas franchie. C'était à l'Allemand Otto qu'était réservé l'honneur de devenir, selon l'heureuse expression de M. Witz, le Watt du moteur à gaz, en créant en 1876 le type du moteur *à quatre temps*. Qu'on nous permette d'insister sur la signification de ce terme, car nous y trouverons la caractéristique du fonctionnement des moteurs modernes, ou du moins de l'immense majorité d'entre eux.

Supposons d'abord le piston à fond de course, et se déplaçant de manière à accroître la capacité comprise entre sa paroi et celle du cylindre ; pendant ce premier temps, des soupapes s'ouvrent automatiquement, qui laissent pénétrer dans cet espace des proportions de gaz combustible et d'air réglées par la section des orifices

d'admission ; puis les soupapes se ferment, le piston revient sur lui-même, et pendant ce deuxième temps de l'opération, le mélange gazeux est comprimé dans un espace laissé libre au fond du cylindre, et qu'on nomme la chambre de combustion ; il est alors enflammé, par exemple à l'aide d'une étincelle fournie par une bobine d'induction, et la pression, produite dans les gaz par la température élevée à laquelle ils sont portés, repousse violemment le piston vers l'extérieur : c'est le troisième temps de l'opération, à la suite duquel le piston, revenant vers le fond du cylindre, expulse les gaz brûlés à travers un orifice qui s'ouvre à point nommé. Puis la même série d'opérations se renouvelle indéfiniment : admission des gaz, compression, explosion, poussée du piston, expulsion des résidus.

Le cycle des opérations comprend donc quatre temps, c'est-à-dire quatre mouvements du piston, deux allers et deux retours ; sur ces quatre temps, un seul est moteur, c'est le troisième, où la force expansive des gaz brûlés pousse le piston en avant ; les trois autres mouvements n'ont lieu qu'en vertu de la vitesse acquise pendant celui-là, et c'est ce qui explique la nécessité, reconnue par tous les constructeurs, de munir les moteurs à gaz de volants de grande masse, destinés à emmagasiner l'énergie pendant le temps moteur pour la répartir sur les autres

temps et régulariser ainsi le mouvement de l'axe. Remarquons enfin, pour en finir avec cet exposé technique, que le moteur à gaz, tel que nous venons de le décrire, est à simple effet, c'est-à-dire que la pression du gaz n'agit jamais que sur une des faces du piston : nouvelle différence avec la machine à vapeur à double effet, dans laquelle, grâce aux tiroirs ou aux systèmes équivalents, le piston reçoit alternativement sur ses deux faces la pression de la vapeur.

Tel est, réduit à son squelette, l'appareil qu'Otto et son collaborateur Langen lancèrent dans l'industrie à partir de 1876, et dont les ateliers de Cologne et les sociétés concessionnaires à l'étranger, livrèrent en dix ans plus de cinquante mille exemplaires. C'étaient, pour la plupart, des moteurs de puissance médiocre, inférieure à dix chevaux, et alimentés au gaz d'éclairage ; leur rendement était faible, et il n'en pouvait être autrement avec des appareils de petites dimensions, où les masses gazeuses sont plus soumises à l'influence refroidissante des parois, et où les causes accessoires de déperdition, comme les frottements, acquièrent une importance proportionnelle considérable. De plus, le gaz d'éclairage est, dans la plupart des villes, d'un prix exagérément élevé ; aussi la machine à vapeur, alors dans le plein de sa gloire, pouvait considérer sans inquiétude ce nouveau-né de l'industrie ; d'autant plus que,

particulièrement appropriée aux grandes puissances et aux travaux réguliers, elle laissait sans regret au moteur à gaz la production des puissances faibles et discontinues ; plus l'un devenait grand, plus l'autre se faisait petit ; ainsi tous deux pouvaient exister côte à côte sans entrer en concurrence.

D'un autre côté, malgré ces médiocres conditions économiques, la machine d'Otto présentait des avantages essentiels, quoique difficiles à chiffrer : de la suppression de la chaudière résultait une diminution notable d'encombrement ; du même coup, de nombreuses chances d'accident disparaissaient, si bien que les moteurs dits à explosion étaient les seuls avec lesquels une explosion ne fût plus à craindre. Ce double avantage rendait possible l'installation des moteurs à gaz en dehors des usines spécialisées, dans les ruches ouvrières des grandes villes où sont condensés dans un petit espace tant d'habitants et tant d'industries, et où l'administration interdit à juste titre l'emploi des machines à vapeur ; de plus, le travail intermittent de la plupart des petits ateliers s'accommode à merveille d'un appareil toujours prêt à entrer en service à point nommé, et dont le maniement est si simple que le premier venu peut le mettre en marche, qu'il fonctionne sans surveillance, et qu'on l'arrête en tournant un robinet.

Toutes ces raisons devaient assigner au moteur

à gaz, pour les faibles puissances, un rôle important et complémentaire de celui que joue la machine à vapeur dans la grande industrie ; en même temps, et par une modification de détail, de nouvelles applications s'ouvraient devant lui : l'emploi du gaz d'éclairage l'asservit aux canalisations urbaines, mais il est possible de remplacer ce combustible par la vapeur d'essence de pétrole, de benzine ou d'alcool. Que l'air, avant de pénétrer dans le cylindre du moteur, traverse un réservoir, nommé carburateur, où il entre en contact avec le liquide en question, il lui enlèvera une partie de sa vapeur, et l'ensemble, dilué encore dans un excès d'air, formera un mélange explosif qui pourra remplacer sans aucune difficulté le mélange d'air et de gaz d'éclairage. Aussi tous les moteurs à gaz peuvent-ils fonctionner indifféremment au pétrole, au gaz ou à l'alcool : c'est, d'un seul coup, la conquête des routes et des champs, peut-être même celle de l'air, après celle des agglomérations urbaines ; commencée, vers 1885, en France et en Allemagne, par Delamare-Deboutteville, Daimler, Levassor et Panhard, de Dion et Boulon, elle a abouti à l'admirable essor que chacun sait ; elle vaudrait à elle seule une étude spéciale, et nous devons nous contenter de la signaler en passant.

*
* *

Jusqu'ici, les moteurs à explosion, quel que soit le combustible qui les alimente, nous apparaissent surtout comme des appareils de puissance médiocre, et qui doivent, non à l'excellence de leur rendement, mais à la commodité de leur usage, la généralisation de leur emploi. Dès lors, une question se posait avec un pressant intérêt : n'était-il pas possible d'amener ces appareils à devenir des générateurs de travail mécanique aussi, et même plus économiques que la machine à vapeur ? La réponse, dès l'abord, pouvait sembler douteuse ; en effet, si la série des transformations subies par le mélange gazeux pendant les quatre temps de l'opération est moins avantageuse que le cycle théorique d'opérations défini par Carnot et que la machine à vapeur réalise approximativement, en revanche, le moteur à explosion échappe au grand inconvénient que nous avons signalé pour sa rivale, et qui tient au faible écart des températures entre lesquelles évolue la vapeur. La compression préalable et l'explosion du mélange dans le cylindre du moteur à gaz élèvent la température dans ce cylindre au voisinage de 1.700 degrés, et les produits de la combustion s'échappent dans l'air à une température peu supérieure à 200 degrés, ce qui donne 1.500

degrés pour l'écart des températures entre lesquelles le gaz évolue ; pour les machines à vapeur à haute pression et à condensation, l'intervalle correspondant est voisin de 200 degrés, c'est-à-dire sept fois et demi moindre, et cette seule disproportion permet de se rendre compte que le moteur à gaz ne soit pas soumis aussi étroitement que son puissant concurrent à la fatalité des faibles rendements. Après avoir ainsi acquis des raisons d'espérer, les techniciens se mirent à l'œuvre ; leur effort porta sur trois points.

En premier lieu, ils s'attachèrent à construire des moteurs de plus forte puissance, supérieure à vingt chevaux, allant parfois à cinquante et à cent, estimant à juste titre que ce n'est que pour de semblables types qu'on peut diminuer notablement la part proportionnelle de ces pertes inévitables d'énergie qui sont comme les frais généraux de toute transformation : perte de chaleur par les surfaces, influence des parois du cylindre sur la température des gaz inclus, enfin, pertes par frottement entre les pièces en mouvement. D'autre part, les spécialistes avaient déjà, et depuis longtemps, pu se rendre compte des avantages économiques de la compression du mélange gazeux, réalisée avant l'explosion ; par elle, on pouvait accumuler dans un plus petit espace une masse plus grande du mélange inflammable, et l'influence pernicieuse des parois prenait par là une moindre importance rela-

tive ; enfin, la compression préalable réalisait un mélange plus intime du combustible et du comburant, et permettait d'élever de quelques centaines de degrés la température de ce mélange. Toutes ces considérations, précisées en des formules mathématiques, amenèrent à accroître progressivement la compression préalable ; on était parti de trois atmosphères environ : on comprime aujourd'hui couramment jusqu'à cinq, dix, et même, dans des moteurs tout nouvellement construits et qui donnent les plus belles espérances, à trente-cinq atmosphères.

Enfin, et c'était un troisième point à réaliser de toute nécessité, il fallait trouver pour alimenter les moteurs un combustible plus économique que le gaz, la gasoline ou l'alcool ; cette dernière difficulté a été surmontée, comme les autres, et nous en devons la solution à l'ingéniosité des ingénieurs anglais, principalement de Dowson et de Taylor.

*
* *

Ceux qui ont conservé, de l'enseignement de chimie reçu au lycée, un autre souvenir que celui d'un ennui profond et d'une utilité contestable, peuvent avoir gardé dans leur mémoire le nom du *gaz à l'eau*, auquel se rattachait une expérience de cours que chacun peut répéter à son gré : le maître plongeait dans l'eau un mor-

ceau de charbon bien allumé ; il se dégagait quelques bulles de gaz qu'on pouvait recueillir dans une éprouvette et ensuite enflammer. Ce gaz, qui se produit en quantités plus notables quand on fait passer la vapeur d'eau sur du coke porté au rouge, est le gaz à l'eau ; provenant de la décomposition de l'eau par le charbon, il est formé essentiellement par un mélange d'hydrogène et d'oxyde de carbone, tous deux éminemment combustibles.

D'un autre côté, on peut encore obtenir un gaz combustible, le *gaz à l'air*, en faisant passer simplement de l'air sur du coke incandescent ; il se produit alors un mélange d'azote, d'acide carbonique et d'oxyde de carbone, ce dernier seul étant susceptible de brûler. Ces deux réactions, connues depuis longtemps, n'avaient jamais servi, en France, qu'à tracas-ser les candidats au baccalauréat ; Dowson, en Angleterre, leur trouva un emploi plus utile, en imaginant de les employer pour 'alimenter les moteurs à gaz. Actuellement, l'industrie est en possession d'appareils appropriés à la production de ce combustible économique qu'on appelle généralement le *gaz pauvre* : pauvre en calories, effectivement, car il a un pouvoir calorifique quatre fois moindre que celui du gaz d'éclairage, à volume égal ; le moteur en absorbe plus qu'il ne consomme de ce dernier, et sa puissance est diminuée d'un quart environ ; mais, en revanche,

le gaz pauvre coûte dix fois moins, en moyenne, que le gaz d'éclairage, et cela suffit pour faire pencher la balance en sa faveur. Aussi les installations modernes tendent-elles de plus en plus à constituer l'usine génératrice de force par l'accouplement du moteur à gaz et du gazogène. La réaction qui donne naissance au gaz pauvre s'effectue dans un appareil analogue à nos poêles domestiques, dits continus; le chargement d'anthracite ou de braisette s'effectue semblablement par un orifice placé à la partie supérieure, tandis que, sous la grille, sont injectés de l'air et de la vapeur d'eau qui provient d'une petite chaudière; les produits de la réaction, mélange de gaz à l'eau et de gaz à l'air, passent à travers divers épurateurs à eau, à sciure de bois et à coke, puis vont s'emmagasiner dans une cloche, où le moteur puise son aliment. Souvent même, ce réservoir est supprimé, et c'est l'appel produit par le mouvement du piston dans le cylindre qui fait passer l'air dans le gazogène, et y puise, au fur et à mesure des besoins, le gaz nécessaire.

Grâce à cet ensemble de modifications, le moteur à gaz moderne prend un intérêt nouveau; son rendement, mesuré expérimentalement, s'élève à 20 et jusqu'à 24 p. 100 : il rend, sous forme mécanique, presque le quart de ce qu'il a absorbé en calorique, et si ce rendement, deux fois supérieur à celui des machines à va-

peur, peut encore sembler médiocre, il ne faut pas oublier que nous sommes en pleine marche ascendante; ces mêmes moteurs, il y a quinze ans, ne rendaient pas 10 p. 100 et il n'y aucune raison théorique pour qu'on n'atteigne pas 35 ou 40; on y arrivera même à coup sûr, le jour où on saura réaliser les compressions préalables suffisantes. En tous cas, on peut affirmer aujourd'hui, d'accord avec presque tous les techniciens, que le moteur à gaz est, pour les puissances médiocres, au moins équivalent aux machines à vapeur à échappement libre, et, pour les fortes puissances, supérieur aux meilleures machines à condensation¹.

C'est ce qui explique les applications de plus en plus nombreuses qui en ont été faites à des

1. On peut s'en rendre compte en consultant le tableau suivant, établi par M. L. Saint-Martin d'après les mesures faites en marche industrielle dans de nombreuses usines :

PRIX DE REVIENT INDUSTRIEL DU CHEVAL-HEURE UTILE		
Puissance en chevaux-vapeur.	Machine à vapeur.	Moteur à gaz.
	A échappement libre.	Au gaz d'éclairage.
5 chevaux	de 0 ^r 43 à 0 ^r 71	de 0 ^r 33 à 0 ^r 55
10 —	0 34 0 57	0 27 0 43
20 —	0 26 0 43	0 22 0 37
40 —	0 20 0 34	0 20 0 34
	A condensation.	Au gaz pauvre.
50 —	de 0 ^r 18 à 0 ^r 30	de 0 ^r 125 à 0 ^r 21
60 —	0 17 0 28	0 115 0 19
100 —	0 14 0 23	0 10 0 16

installations de grande puissance allant jusqu'à 250 chevaux. Cette fois, la machine à vapeur est attaquée en face, dans le domaine qui lui semblait exclusivement réservé ; elle bénéficie encore, et à juste titre, de la confiance que mérite un appareil qui a fait ses preuves depuis plus d'un siècle, et, ne lui restât-il dans l'avenir que la traction sur voies ferrées ou la propulsion des navires, ce serait encore un lot appréciable ; mais cela même est encore douteux. Contentons-nous d'ailleurs, sans escompter l'avenir, de prendre une idée nette de la situation présente. Il nous reste pour cela à indiquer la très importante modification qu'est en train de subir, grâce au moteur à gaz, la plus colossale des industries modernes, celle du fer.

* * *

Le premier stade de cette industrie est la fabrication de la fonte. Chacun sait que, dans la panse profonde des hauts fourneaux où elle s'accomplit, on verse par en haut des lits successifs de coke, de minerai et de calcaire, tandis que des machines soufflantes injectent de l'air par le bas à travers la masse solide incandescente ; alors, la fonte et les laitiers en fusion s'écoulent dans le creuset placé à la partie inférieure, en même temps que des torrents de gaz s'échappent par l'ouverture supérieure, ou gueulard, du haut

fourneau. Ces gaz, formés pour plus d'un quart d'oxyde de carbone, sont combustibles¹; jadis, on les laissait brûler librement, et tous ceux qui ont parcouru autrefois les régions métallurgiques de Belgique et d'Angleterre, ont gardé inoubliablement dans leur mémoire, la vision de ces torches gigantesques, de ces flammes tordues par le vent et rendues rougeâtres par la combustion des fumées et des poussières entraînées, et qui semblaient, surtout dans la noirceur des nuits, érigées pour le culte de quelque divinité infernale.

Les hauts fourneaux d'aujourd'hui ne présentent plus un spectacle aussi pittoresque; leur gueulard est fermé, et les gaz qui s'en échappent sont soigneusement recueillis; ils servent, en brûlant dans des ruches en briques, à échauffer l'air injecté par les souffleries dans la masse en réaction; c'est grâce à cette récupération de chaleur effectuée dans l'appareil nommé Cowper,

1. Un mètre cube de ces gaz comprend, en moyenne :

Oxyde de carbone.	0 ^{me} ,275
Acide carbonique	0 100
Hydrogène.	0 030
Azote	0 545
Vapeur d'eau	0 050
	1 ^{me} ,000

La chaleur dégagée par la combustion d'un pareil mélange, dilué d'air, serait théoriquement de 907 calories, dont 827 pour l'oxyde de carbone et 80 pour l'hydrogène. En fait, les mesures directes ont donné des nombres compris entre 950 et 1 000 calories par mètre cube.

que la dépense de coke a pu être réduite des trois quarts et ramenée à 1 kilogramme de coke pour chaque kilogramme de fonte produite ; une partie des gaz sert, en outre, en brûlant sous des chaudières, à entretenir les machines à vapeur qui actionnent les souffleries et les monte-charges. Ainsi, l'utilisation des gaz de hauts-fourneaux a constitué pour la métallurgie de la fonte un progrès de première importance, qu'on comprend mieux encore si on a pris une idée de la masse des gaz combustibles produits : considérons, par exemple, un haut fourneau de cent tonnes, c'est-à-dire produisant en marche courante 100 tonnes de fonte par vingt-quatre heures ; de semblables appareils sont aujourd'hui réputés de dimensions modestes, car il existe nombre de hauts fourneaux de 200 et 300 tonnes, et même les gigantesques appareils installés à Duquesne, aux États-Unis, par le célèbre américain Carnegie, produisent en moyenne 750 tonnes par jour. Donc, un haut fourneau de 100 tonnes dégage journellement au minimum 800.000 mètres cubes de gaz, c'est-à-dire de quoi gonfler un ballon sphérique de 120 mètres de diamètre ; la combustion de cette bulle de gaz dégagerait 800 millions de calories, assez pour porter de zéro degrés à l'ébullition, 8.000 mètres cubes d'eau. Ces chiffres appliqués à un seul appareil, de dimensions moyennes, permettent d'apprécier quelle somme formidable d'énergie calorifique

représentent les gaz de haut fourneau dans les grands centres métallurgiques comme la Lorraine, le Luxembourg, la Prusse rhénane ou la Belgique. Cette énergie est-elle bien utilisée, ou, au contraire, est-elle dilapidée dans les installations modernes? Telle est la question qu'on s'est posée, et à laquelle un ingénieur, M. Gredt, a pu répondre en établissant clairement le bilan calorifique d'un haut fourneau¹.

La lecture de ce tableau fournit la preuve qu'il y a encore, malgré les progrès réalisés, un véritable gaspillage d'énergie. Les régénérateurs Cowper fonctionnent admirablement, et il semble bien difficile de les amener à un rendement supérieur à sa valeur présente; mais, en revanche, 350 millions de calories sont emportés

1. Voici, un peu arrondis, les chiffres de ce bilan :

EN 24 HEURES	MILLIONS DE CALORIES	
	reçues	utilisées ou perdues
Chargement de 100.000 kg. de coke	650	»
Calories apportées par l'air chaud des Cowper.	410	»
Réactions chimiques produites dans le haut fourneau.	»	190
Combustion des gaz dépensés pour réchauffer l'air	»	470
Combustion des gaz dépensés sous les chaudières	»	50
Calories emportées par les gaz non recueillis.	»	350
	1 060	1 060

chaque jour par les gaz qu'on laisse perdre, et, quant aux 50 millions qu'on emploie à chauffer les chaudières, ils paraissent bien médiocrement utilisés, car la puissance mécanique produite ne représente pas plus de 350 chevaux, ce qui correspond à un rendement voisin de 3 p. 100 ; on s'en contentait, jusqu'ici, parce qu'on n'avait pas l'emploi d'une puissance supérieure, et que ces 350 chevaux suffisaient à faire tourner toute la machinerie des hauts fourneaux.

Les choses en étaient là, quand un praticien anglais éminent, M. Thwaite, proposa de remplacer par des moteurs à gaz les machines à vapeur employées au service des hauts fourneaux. L'idée, il faut l'avouer, ne souleva, dès l'abord, qu'un médiocre enthousiasme ; en fait, les critiques avaient beau jeu ; le gaz produit, contenant les trois quarts de produits inertes, azote et acide carbonique, n'a qu'un faible pouvoir calorifique ; à volume égal, il dégage, en brûlant, un tiers de chaleur en moins que le gaz pauvre ; aussi son inflammation dans le cylindre du moteur ne se produit-elle pas sans quelque difficulté ; il y a, suivant l'expression reçue, des ratés qui nuisent à la régularité de la marche et diminuent la puissance obtenue. Une difficulté plus grande encore, peut-être, tient à la présence des poussières minérales entraînées avec les gaz ; dans beaucoup d'usines, surtout dans celles où on traite des résidus de pyrite, chaque mètre

cube entraîne avec lui 100 grammes de poussières solides ; la majeure partie est assez facile à arrêter, en faisant passer le gaz à travers des épurateurs spéciaux, mais il reste encore des poussières, 3 grammes environ par mètre cube, dont la ténuité est telle qu'elles franchissent tous les obstacles qu'on peut leur opposer sur un parcours de 5 à 600 mètres ; dans un ballon en verre rempli de gaz des hauts fourneaux, elles forment un brouillard blanc qui ne se dissipe qu'au bout de plusieurs jours. Aussi pouvait-on redouter que ces poussières solides ne vinssent obstruer rapidement les cylindres des machines, et astreindre à un nombre exagéré de démontages ; il était facile en effet de calculer qu'un moteur de cent chevaux, si cette poussière se condensait sur ses parois, serait vite mis hors de service par des dépôts pouvant atteindre 25 kilogrammes par jour. Par bonheur, les objections que nous venons de présenter sont pareilles à ces bâtons flottants qui apparaissent de loin comme des vaisseaux de haut bord ; les poussières tant redoutées sont tellement fines qu'elles n'ont pas le temps de se déposer dans l'intérieur du moteur ; elles sont intégralement expulsées avec les gaz brûlés ; il s'est même trouvé que l'encrassement était moindre qu'avec le gaz d'éclairage, dont les carbures laissent un dépôt de suie. Quant à la première difficulté, celle qui provient des ratés d'allumage, on a pu constater qu'il suffi-

sait, pour s'en rendre maître, d'accroître la compression préalable jusqu'au voisinage de 10 atmosphères, et qu'on obtenait alors une marche parfaitement régulière.

C'est l'honneur de M. Thwaite de ne pas s'être laissé décourager par les objections et d'avoir poursuivi son œuvre avec une ténacité vraiment anglaise. Dès 1895, il essayait en Écosse, puis en Belgique, d'alimenter au gaz des hauts fourneaux des moteurs de faible puissance; le succès répondit à ses espérances et à ses efforts; il reconnut en même temps l'inutilité des épurateurs compliqués par lesquels on avait espéré barrer la route aux poussières solides, et même des cloches à gaz employées pour amortir les variations de pressions qui résultent des changements d'allure du haut fourneau. Aussitôt après ce premier succès, les essais furent continués avec des appareils plus puissants; un moteur de 200 chevaux fut mis en service à Seraing, un autre de 600 chevaux aux mines de Hoërde; après deux ans de marche continue, après tous les essais et toutes les déterminations effectués par les techniciens les plus autorisés, aucun doute ne pouvait subsister: l'idée de M. Thwaite était réalisable; il ne reste plus qu'à se convaincre qu'elle entraîne avec elle une meilleure utilisation des énergies du haut fourneau. Or, supposons même qu'on renonce à recueillir les gaz actuellement perdus par suite de fuites dans

la canalisation et à la fermeture du gueulard, fuites qu'il ne paraît pas malaisé de diminuer dans une large mesure, et qui emportent au dehors plus du quart de l'énergie calorifique du haut fourneau ; supposons qu'on se contente d'utiliser directement dans les moteurs à gaz les calories actuellement employées au chauffage des chaudières : la puissance mécanique engendrée par ces moteurs représente, à très peu près, 2.350 chevaux, au lieu de 350 produits actuellement par les machines à vapeur actionnées avec la même quantité de gaz, soit un gain gratuit de 2.000 chevaux par haut fourneau de 100 tonnes.

Pour la France entière, dont la production annuelle est de 2.500.000 tonnes, c'est donc une puissance totale de 150.000 chevaux qui est offerte, et qui ne demande que la peine de la recueillir ; si l'on veut évaluer les choses autrement, c'est une rente annuelle voisine de 15 millions dont nos industries peuvent profiter ; et la France ne se place, au point de vue de la production de la fonte qu'au quatrième rang, très loin après les Etats-Unis, l'Angleterre et l'Allemagne ; on peut apprécier par là le rôle que la transformation préconisée par M. Thwaite est appelée à jouer dans le monde industriel ; et pour donner à cette innovation sa véritable portée, il faut noter que la puissance engendrée par les gaz de haut fourneau est produite, non plus comme celle des chutes d'eau, au cœur de ré-

gions montagneuses, où tout est à créer, mais au sein des pays les plus industriels de la terre, où cent applications diverses lui promettent leur clientèle. Assurément, l'usine métallurgique elle-même absorbera une grande partie de cette puissance, surtout quand, comme il est fréquent, le haut fourneau se double d'aciéries et d'ateliers où les produits de l'industrie sidérurgique sont travaillés ; une part servira à l'éclairage des usines, une autre actionnera les marteaux-pilons et les laminoirs ; le restant pourra, sous forme d'énergie électrique, être distribué et vendu dans un large rayon autour du haut fourneau.

Cette transformation apparaît aujourd'hui comme si importante, qu'on est allé jusqu'à dire que, dorénavant, la fonte ne sera plus qu'un sous-produit du haut fourneau, dont la fonction principale consistera à distribuer dans son entourage la force et la lumière ; il est inutile de pousser ainsi les vérités jusqu'au paradoxe, mais, dès à présent, on escompte que la transformation une fois réalisée permettra d'abaisser d'au moins cinq francs par tonne le prix de la fonte brute, ce qui mettra toutes les usines métallurgiques dans l'obligation d'adopter les méthodes nouvelles, sous peine de se trouver hors d'état de soutenir la concurrence contre les établissements mieux outillés. Aussi, ne faut-il pas s'étonner du mouvement puissant qui entraîne, depuis le

début du xx^e siècle, les métallurgistes vers ce nouvel ordre d'application; dès à présent, on peut estimer que, rien qu'en Europe, 50.000 chevaux sont engendrés par des moteurs alimentés au gaz de haut fourneau; l'Allemagne entre au moins pour moitié dans ce chiffre, suivie par les puissantes usines métallurgiques du Luxembourg; la France, la Belgique suivent de loin; de plus loin encore la vieille Angleterre, qui semble avoir quelque peu perdu de son ancienne énergie dans les luttes industrielles.

*
* *

Résumons-nous, et tâchons de conclure. A côté de la machine à vapeur, parvenue au parfait achèvement de son type, nous avons pu suivre les progrès rapides des moteurs à gaz, débutant, il y a vingt ans, dans la petite industrie, et devenus aujourd'hui capables des plus importantes applications; nous avons vu cette nouvelle machine conquérir la place tenue par sa rivale dans un certain nombre d'industries.

Ainsi, actuellement, trois voies principales s'offrent à nous pour produire économiquement l'énergie mécanique et par elle l'énergie électrique: l'utilisation des chutes d'eau par les turbines, l'emploi du pouvoir calorifique de la houille dans les machines à vapeur; enfin, la production d'énergie, en surcroît de celle de la fonte,

par les moteurs à gaz de haut fourneau. Il serait puéril d'imaginer qu'une seule de ces voies doive être dorénavant utilisée, tandis que les autres seraient complètement délaissées ; en industrie, comme dans la nature vivante, il faut des siècles avant que la lutte pour la vie aboutisse à la suppression d'une espèce : longtemps, elles se développent côte à côte, définissant de mieux en mieux leurs sphères d'influence, se spécialisant chacune dans la fonction à laquelle elle est le plus apte. Aujourd'hui, la vie industrielle des peuples civilisés est assez active et diverse pour faire place à des formes nombreuses et à bien des espèces ; et c'est pourquoi on n'a pas le droit d'escompter la disparition de la machine à vapeur quand le vieux moulin à aubes n'a pas été supprimé par la turbine, et quand, sous nos yeux, les hommes usent encore leurs bras à tourner la roue et à travailler la terre comme aux temps, qu'on proclame disparus, de l'esclavage.

LE TRANSPORT

ET

LA DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

Dans l'incessante évolution du langage, certains mots vieillissent et disparaissent ; d'autres, au contraire, revêtent une pensée nouvelle, et prennent une seconde jeunesse. Tel est le mot *énergie* ; synonyme, autrefois, de vigueur physique ou de ressort moral, il a pris, par le développement des idées scientifiques, une acception plus large et cependant très précise : il représente aujourd'hui la quantité de travail qu'on peut extraire d'un corps ou d'un système quelconque.

Les progrès de la physique au cours des cinquante dernières années nous ont appris que la chaleur, la lumière, l'électricité, le travail mécanique, et aussi cette puissance mystérieuse que les anciens chimistes nommaient l'affinité, et qui éclate lors des réactions chimiques, pouvaient se

transmuter les unes dans les autres, et n'étaient au fond, malgré la multiplicité trompeuse des apparences, qu'une seule et même chose : l'énergie qui réside dans les corps, qui anime leur matière et qui, dans tous les phénomènes, change de forme sans jamais se perdre. Quand la jeune Amérique nous envoie son pétrole et son blé, c'est un peu de sa surabondante énergie qu'elle déverse sur notre vieux continent : le pétrole pour nous donner lumière, chaleur, force motrice, autant de formes de l'énergie ; le blé pour entretenir dans nos corps ces réactions chimiques d'où sortent le travail de nos ouvriers et sans doute aussi l'énergie intellectuelle de nos penseurs. Et en retour, avec ses émigrants, c'est une autre forme d'énergie que l'Europe déverse par delà les mers. Ainsi, fiction d'abord, simple généralisation scientifique, l'idée d'énergie prend peu à peu une forme concrète ; les savants, les ingénieurs, la saisissent et la suivent sous ses perpétuelles métamorphoses, tantôt assoupie et comme en réserve sous la forme d'énergie chimique, tantôt vivante et en acte, comme dans une chute d'eau, un courant électrique.

Longtemps, l'humanité a trouvé, en chaque lieu, dans le travail du vent, des animaux et dans son propre labeur, assez de force motrice pour satisfaire à ses modestes besoins ; l'énergie était alors consommée sur place. Mais avec l'industrialisme des temps modernes, ces besoins

se sont accrus et surtout localisés, parfois au voisinage des mines de houille, des grandes chutes, mais parfois aussi ailleurs, dans les grandes villes, à proximité de gisements métallifères ou d'industries diverses. Alors sont nés véritablement le commerce de l'énergie et son transport des pays de production aux centres d'utilisation. A ce compte, nos vapeurs, nos trains chargés de houille, de pétrole, de blé, sont des transporteurs d'énergie, et, l'énergie étant en toutes choses, tout déplacement est en fait un transport d'énergie. Contentons-nous, toutefois, d'avoir indiqué cette forme très générale du problème, et restreignons-le maintenant à son acception la plus limitée, celle-là même qu'il reçoit dans la langue de l'industrie.

Une roue qui tourne, c'est encore de l'énergie ; c'en est même la forme industrielle par excellence : en elle se résolvent pratiquement la puissance des cours d'eau ou du vent, la chaleur des combustibles, le travail des animaux et des hommes. Ainsi la question à résoudre a pris la forme suivante : étant donné, en un point, un mouvement de rotation, le transformer en un ou plusieurs autres mouvements de rotation réalisés en des points différents du premier.

Ainsi se présente, industriellement, le problème du transport et de la distribution de l'énergie. En examinant les différentes solutions qu'on lui a données, nous suivrons l'ordre histo-

rique, et nous verrons que cet ordre chronologique est en même temps l'ordre logique, et que l'humanité a marché pendant des siècles vers un but qu'elle ne voyait pas, qu'elle voit maintenant, qu'elle atteindra peut-être un jour.

*
* *

La première solution est celle que permettent de réaliser les liaisons solides: l'arbre de couche, qui, en tournant sur ses paliers, transporte d'un bout à l'autre de l'usine la puissance du moteur, les engrenages, les cônes de friction, les manchons d'accouplement en sont les auxiliaires bien connus. Cette solution, qui utilise la propriété caractéristique des solides, à savoir la rigidité, est si claire dans son principe qu'il suffit de l'énoncer pour comprendre qu'elle dut, la première, se présenter à l'esprit humain: elle se rencontre dans les premières machines que l'homme ait réalisées, et il n'est pas d'usine ou d'atelier moderne qui n'en présente l'application. Elle a pour elle l'autorité des siècles. Discutons-la pourtant.

Recommandable par sa simplicité même, elle n'en présente pas moins deux graves inconvénients. Tout d'abord, c'est une solution bien étroite du problème, valable dans un court rayon de quelques décimètres; pour les distances supérieures, la torsion des axes exige qu'on

en exagère le diamètre, c'est-à-dire le poids, qu'on accroisse l'épaisseur des murs qui les soutiennent, par suite les frais d'établissement et d'entretien. Les changements de direction entraînent des complications coûteuses; enfin l'installation, une fois faite ne peut pas être modifiée sans de notables dépenses. Ce défaut d'ampleur et d'élasticité est caractéristique de cette solution par liaisons solides, mais il n'est pas le seul.

En industrie comme partout, rien n'est gratuit, et à propos de chaque transformation nous avons le devoir de nous demander : combien coûte-t-elle? — autrement dit, quel en est le rendement? Or une longue expérience a prouvé que, parmi toutes les transmissions, il n'en est pas de plus onéreuses que les rigides; il n'est pas rare de trouver des usines où 30 et même 40 p. 100 du travail du moteur sont dilapidés le long des arbres, des courroies et des engrenages. Et ce n'est pas seulement du travail perdu, mais du travail nuisible, puisqu'il s'est employé à user les pièces en mouvement et, par suite, à détruire l'installation elle-même. C'est le frottement, plus sensible entre solides que partout ailleurs, le frottement, ce parasite du travail industriel, qui est responsable de cet énorme déchet; c'est par sa faute qu'en dépit de tous les lubrifiants et de tous les graisseurs, un tiers du travail de l'usine est employé à détruire l'usine elle-même; c'est à cause

de lui, et par suite de l'imperfection des transmissions rigides, que la fabrique s'est ramassée autour du générateur de force, au mépris de l'hygiène et de la division rationnelle du travail, au lieu d'étendre au large, en plein air et en pleine lumière, la série de ses ateliers.

Cependant, à mesure que la concentration industrielle allait en s'aggravant autour de la machine à vapeur, d'autres solutions s'esquisaient, sorties non d'un rêve humanitaire, mais de tentatives intéressées. En Suisse, comme dans tous les pays montagnaux, les cours d'eau roulent souvent au fond de gorges si étroites que, s'il est possible d'installer sur leurs bords des turbines ou des roues hydrauliques, en revanche il ne faut pas songer à y bâtir l'usine où la force captée pourra être utilisée ; ce n'est souvent qu'à plusieurs centaines de mètres plus loin, par delà le talus à pic du torrent, qu'une usine peut fonctionner, accessible aux ouvriers et aux marchandises. C'est pour relier la station génératrice, située en bas, à l'usine d'utilisation, placée plus haut, que les ingénieurs suisses ont créé, il y a cinquante ans, les câbles téléodynamiques, ou transmissions funiculaires, dont l'emploi, débordant les frontières de leur pays, s'est étendu à de nombreux établissements placés dans des conditions analogues et en particulier à ceux qui s'égrènent sur les rives de

l'Ain, dans un pays d'industrie où abondent les minoteries, les fabriques d'objets tournés en bois, en caoutchouc durci, en celluloid.

En principe, le câble funiculaire est le développement de la courroie. Fait de fils métalliques tordus, roulant sans fin sur des poulies à gorge, il se prête à des transmissions de plusieurs centaines de chevaux à quelques hectomètres de distance. Déjà, cette solution n'a plus la rigidité de la transmission par axes ; le solide qui transmet la force travaille par sa flexibilité, c'est-à-dire par celle de ses propriétés qui le rapproche des fluides. Quand on étudie les transmissions téléodynamiques, on est tenté d'abord de voir en elles la solution parfaite du problème posé ; pour l'économie de son installation, pour la valeur élevée de son rendement, elle semble n'avoir point de rivales ; et c'est pourquoi on s'étonne qu'elle n'ait pas joué dans la transmission de l'énergie, le rôle important auquel elle paraissait destinée. Il semblerait presque qu'une sorte de fatalité dût amener cette solution à son heure, pour la faire disparaître aussitôt devant d'autres. Bien entendu, la fatalité n'est qu'un mot, et si les industriels ont abandonné, après essai, les transmissions funiculaires, ce n'est pas pour avoir l'honneur de frayer le chemin du progrès ; c'est parce qu'ils leur ont reconnu, à l'usage, un grave inconvénient : celui d'exiger de fréquentes réparations, coûteuses, non par elles-mêmes, mais parce

qu'elles arrêtent chaque fois la marche de l'usine. Pourtant, les câbles téléodynamiques gardent encore certaines clientèles spéciales : c'est eux, souvent, qu'on charge de transporter aux usines les minerais extraits du flanc des montagnes ; ils sont donc des chemins qui marchent dans les airs ; et c'est à eux encore que l'on a confié, sans doute pour peu d'années, la conduite des signaux le long des voies ferrées.

Ainsi, cette solution, créée il y a un demi-siècle, est déjà vieillie, et d'autres venues après elles ont passé également sans même avoir le temps de conquérir ces heures prospères auxquelles leur donnait droit l'ingéniosité de leurs inventeurs, et qu'elles eussent sans doute connues si le progrès avait continué à marcher du même pas qu'aux siècles passés.

Il était dans l'ordre des choses qu'après avoir employé les solides pour transmettre la puissance, on eût ensuite recours aux liquides ; mais la distribution hydraulique d'énergie devait, en pratique, venir comme surcroît d'une modification plus profonde.

Depuis que les hygiénistes ont proclamé et fait triompher le droit à l'eau pure, toutes les agglomérations urbaines se sont complétées par une canalisation d'eau. Puisée aux sources et aux rivières, élevée en des réservoirs par des machines, elle constitue une réserve non pas

seulement de propreté et santé, mais encore d'énergie, utilisable partout où un tuyau de plomb peut amener le liquide sous pression. On peut la transformer en travail mécanique à l'aide de moteurs à eau, turbines, roues hydrauliques, moteurs à cylindre et à piston construits sur le modèle des machines ordinaires à vapeur; et ces transformateurs sont en général d'excellents appareils dont le rendement est largement suffisant. Ainsi, nous arrivons à concevoir une solution plus large du problème posé: l'énergie produite en un point par de puissantes machines serait transmise et distribuée, dans un rayon de plusieurs kilomètres, à tout un peuple de travailleurs.

Pourtant cette solution si simple, toute faite, peut-on dire, puisque partout existent des canalisations d'eau, n'a pas vécu. C'est à peine si, dans de grandes villes, il existe çà et là quelques moteurs hydrauliques, et tous desservent, non pas une industrie privée, mais des services publics, moins sévèrement asservis aux règles de l'économie. De fait, cette solution est coûteuse: dans un but d'assainissement et d'hygiène, on est allé chercher, souvent fort loin, les sources les plus pures; mais les moteurs hydrauliques n'ont pas besoin d'eau pure; ils exigent de l'eau à bon marché et sous une forte pression. C'est qu'en effet le frottement est l'éternel parasite des transports d'énergie; tout le long des

tuyaux, et d'autant plus qu'ils sont plus étroits, il use la puissance du flux liquide en ralentissant sa vitesse et en diminuant sa pression. Cette usure, proportionnelle à la vitesse, est d'autant plus faible, pour une puissance donnée, que cette puissance est transmise sous une moindre vitesse du flux liquide. Il fallait donc, si on voulait diminuer cette perte de puissance en cours de transmission, ou bien élargir les tuyaux et consommer un grand volume d'eau, solution inacceptable pour des raisons d'économie qui sautent aux yeux, ou bien augmenter la pression de l'eau distribuée, ce qui permettait d'effectuer un travail notable avec une faible dépense de liquide. Une épreuve pratique des transmissions hydrauliques exigeait donc une installation spéciale avec pressions atteignant quinze ou vingt atmosphères : on ne l'a pas fait, et le système des transmissions hydrauliques perdait par là même toute valeur économique.

A défaut de cette tentative, un autre essai du même ordre a du moins subi l'épreuve des applications industrielles ; je veux parler de la distribution de puissance par l'air comprimé. Lancée par des spéculateurs très osés, elle a partiellement réussi, et son succès eût sans doute été plus grand si l'électricité ne fût, au même moment, entrée en scène. De fait, elle présente, par rapport aux transmissions hydrauliques, de notables avantages. Il est inutile,

pour obtenir la pression, d'employer des réservoirs surélevés. Un jeu de pompes refoule l'air ambiant dans de grands récipients en tôle sous une pression voisine de sept atmosphères, d'où il chemine, par des canalisations souterraines, jusqu'aux points d'utilisation ; l'air y travaille par sa détente dans des cylindres dont il actionne les pistons, et, une fois encore, le problème posé a reçu une solution ; solution plus économique que la précédente, parce qu'elle est d'installation moins coûteuse et qu'elle supporte une moindre perte par frottement dans les conduites.

Elle aussi, pourtant, a sa tare, et, si la théorie permettait de la prévoir, l'expérience seule devait en faire estimer l'importance. On sait que la compression des gaz dégage de la chaleur, et que leur détente en absorbe ; il résulte de là qu'en transportant l'énergie mécanique de l'usine génératrice aux moteurs où elle reçoit son application, on a réalisé en même temps un transport en sens inverse de chaleur de ceux-ci à l'usine centrale. La compression de l'air dans les réservoirs y provoque, d'une façon continue, un dégagement de chaleur qui peut être agréable en hiver et qui, dans aucun cas, ne constitue un grave inconvénient ; mais il n'en va pas de même à l'autre bout, où la décompression provoque un phénomène inverse ; ce n'est pas que des réclames intéressées ne l'aient représentée comme destinée à entretenir dans les ateliers

une délicieuse fraîcheur, mais en réalité elle a pour effet principal de provoquer la condensation de l'humidité contenue dans l'air qui travaille à la détente ; cette eau accumulée dans les coudes des canalisations y gêne la transmission ; elle peut même, en hiver, s'y congeler et arrêter la marche des moteurs.

C'est un peu par ces raisons, beaucoup par la concurrence de l'électricité, que les transmissions par l'air comprimé, en dépit d'un brillant départ, ont vu bientôt leurs progrès rester stationnaires, puis leurs applications se limiter. En tous cas, il est certain qu'elles ne doivent pas disparaître tout entières, et ce serait avoir une idée bien superficielle de l'évolution industrielle, que de croire qu'elle doit imposer partout des règles uniformes ; il n'est pas de découverte inutile, et la diversité des cas particuliers est telle, qu'il en existe toujours pour toutes les solutions. Il y aura toujours des transmissions par axes rigides, par courroies, par l'eau ou l'air sous pressions : c'est ainsi que le forage des tunnels, ou des galeries de mines, opération chaque jour plus fréquente, fournit aux transmissions pneumatiques une carrière naturelle, car elles assurent en même temps le renouvellement de l'air au fond des galeries, et contribuent à y rafraîchir une température souvent excessive.

D'autre part, il est une forme des transmissions

d'énergie par les gaz dont l'importance est devenue, depuis vingt années, considérable : les canalisations de gaz d'éclairage, créées exclusivement pour porter la lumière dans tous les points d'une même cité, servent également à y convoier la force motrice ; la merveilleuse commodité du moteur à gaz, sa parfaite appropriation aux exigences des ateliers urbains, n'ont pas peu contribué au développement de cette nouvelle application ; 5 p. 100 des gaz produits sont ainsi employés, dans certaines villes, à la production de la puissance mécanique. Mais il y a plus : dans les grandes cités américaines, on commence à distribuer le gaz aux banlieues les plus éloignées, non plus sous la faible pression que développe le poids des cloches, mais sous des pressions beaucoup plus fortes développées par de puissantes pompes foulantes ; on assure ainsi l'écoulement d'une quantité suffisante de gaz dans des tuyaux de dimensions réduites, et on évite les frais considérables que causerait une canalisation à basse pression, de section nécessairement plus grande ; au point d'arrivée, la pression est réduite avant que le gaz ne soit livré à la consommation. Ces procédés présentent une frappante analogie avec ceux de la distribution d'électricité à haute tension, que nous aurons lieu d'examiner tout à l'heure.

D'ailleurs, le dernier mot n'est pas dit sur la distribution de la force par les gaz combustibles ;

aux Etats-Unis, il existe autour de certaines sources de gaz naturel des canalisations qui, sur un développement de plusieurs centaines de kilomètres, répartissent et distribuent l'énergie sortie des entrailles du sol : et il ne faut pas oublier non plus qu'on a examiné de très près, dans ces dernières années, un projet pour l'alimentation de Paris en gaz d'éclairage, projet qui consiste à produire ce gaz au pied des mines du Nord et du Pas-de-Calais, et à le convoyer ensuite par une canalisation de 200 kilomètres jusqu'à la capitale.

*
* *

L'histoire du progrès humain nous montre qu'il est des découvertes qui doivent être faites une seconde fois, parce qu'elles ont passé inaperçues, et qu'elles sont venues avant l'heure où leurs conséquences pouvaient se développer ; cinq cents ans après Erik le Roux, il a fallu que Christophe Colomb retrouvât l'Amérique, pour qu'elle fût vraiment découverte. Ainsi telle idée, qui repose oubliée au fond des livres, attend plusieurs années qu'un homme prononce le mot magique qui porte en lui le pouvoir de la réveiller, de la faire vivre et de fixer sur elle l'esprit des autres hommes.

Tel fut le sort de la transmission électrique de la force. Depuis Gramme, l'inventeur de la

dynamo, on savait que cet admirable outil de transformation est réversible, c'est-à-dire qu'il peut à volonté fournir de l'énergie électrique en absorbant du travail mécanique, ou inversement absorber la première en régénérant le second ; et en 1873, Hippolyte Fontaine, un des créateurs de l'électrotechnique, avait montré à l'Exposition de Vienne cette réversibilité sous une forme saisissante : deux dynamos étaient liées par un même circuit électrique, et la première, la génératrice, produisait en tournant un courant que la deuxième, la réceptrice, utilisait pour fonctionner comme moteur. Les visiteurs regardèrent et passèrent. Il fallut qu'en 1880 Marcel Deprez trouvât pour l'idée le mot qui devait l'enfoncer dans les esprits, exciter les controverses, susciter les expériences : le *transport de la force par l'électricité*.

Ce serait toutefois rendre bien mauvaise justice à ce remueur d'idées qu'est Marcel Deprez que de restreindre son rôle à la trouvaille d'un mot. Homme de laboratoire, il a, avec plusieurs autres, entre autres l'Allemand Fröhlich, abordé par le calcul et par l'expérience le problème de la transmission électrique du travail ; il a vulgarisé par des articles et des conférences les résultats obtenus, il en a exprimé les lois sous des formes simples compréhensibles à tous, et les a condensées dans des formules capables de frapper l'attention. Mais il a fait plus encore : il a

osé, le premier, passer des expériences de laboratoire aux applications industrielles, et montrer à tous, ce qui vaut mieux que tous les raisonnements, des transmissions effectuées à grande distance dans des conditions économiques de rendement. En 1882, à l'Exposition de Munich, une dynamo Gramme, attelée à une pompe rotative, alimentait une chute d'eau artificielle ; cette dynamo réceptrice tirait son énergie d'une autre dynamo, la génératrice, située à 57 kilomètres de là, dans l'usine d'un industriel de Miesbach, et la transmission du courant électrique se faisait, aller et retour, sur des fils télégraphiques en fer galvanisé du modèle ordinaire (4^{mm},5 de diamètre), soutenus, sans précautions spéciales, sur des poteaux en bois. On en est, après ce qu'on sait aujourd'hui sur la transmission des courants à haute tension, à se demander par quel miracle une expérience aussi hardie a pu réussir dans de pareilles conditions ; on ne peut, en tout cas, qu'adhérer au jugement rendu, à la suite de ces mémorables épreuves, par l'Académie des sciences et par le jury même de l'Exposition allemande, qui déclarait : « Nous n'hésitons pas à proclamer la réussite du transport de force de Miesbach à Munich, transport en tout cas important dans l'histoire de l'électrotechnique. » L'année d'après, sur la demande de l'intelligente municipalité grenobloise, ces expériences étaient reprises dans nos Alpes, entre

Grenoble et Vizille : une puissance de 7 chevaux était transportée, sur des fils de bronze de 2 millimètres de diamètre, à 14 kilomètres de distance, et le travail récupéré atteignait 62 p. 100 du travail fourni à la génératrice. Ces essais, ayant la valeur d'une démonstration, devenaient le point de départ d'une foule d'installations industrielles qui ont transformé les Alpes françaises. Vingt ans d'efforts ont amené le triomphe complet des idées préconisées par Marcel Deprez. Il convient maintenant d'analyser les raisons et les conditions de ce succès.

Au point de vue de la commodité, le doute n'est pas possible. Il faut n'avoir jamais visité un atelier moderne pour ignorer les avantages de ces moteurs électriques par lesquels se fait aujourd'hui la commande des machines, depuis les trains de laminoirs jusqu'aux machines à coudre, pour n'avoir pas compris aussi l'avantage de ces conducteurs qui, suspendus en l'air, enterrés, ou accrochés aux murs, portent l'énergie avec une égale facilité dans tous les sens, en effectuent la distribution quelle que soit la forme de l'atelier, et peuvent en quelques heures se déplacer pour permettre de modifier cette distribution. Par là, l'industriel a dans les mains un outil d'une extraordinaire souplesse et l'élan admirable de l'industrie électrique, en multipliant les appareils et les procédés, l'a mis à même de choisir pour chaque cas la solution la meilleure.

Mais ce n'est là qu'un des côtés de la question. Le problème de la distribution et du transport de l'énergie est avant tout d'ordre économique. En définitive, il se pose à chacun, depuis le grand industriel dans son usine jusqu'à l'ouvrier dans son atelier, sous la forme simple suivante : à quel prix minimum est-il possible d'obtenir, au lieu donné, une force motrice constante de puissance déterminée ? Et toutes les autres considérations, par rapport à celle-là, sont d'ordre accessoire. Pour résoudre le problème, il faut évidemment prendre l'énergie aux points où elle est au meilleur marché, sur le carreau de la mine ou au pied du torrent, et la transporter avec un courtage minimum aux points d'application, dans les villes et les centres industriels. C'est donc à des distances considérables que la force motrice doit, en général, être transportée, puisque mines et torrents sont le plus souvent éloignés des agglomérations urbaines, installées au centre des plaines fertiles nécessaires à leur alimentation. Ainsi posé, le problème du transport des forces motrices a pu être résolu par l'emploi des courants à haute tension.

Pour l'électricité, en effet, comme pour l'eau ou l'air comprimé ou toute autre espèce de transmission, il serait illusoire de penser que le transport de l'énergie soit gratuit. Il est toujours frappé d'une double taxe, l'une immobilière,

représentée par l'intérêt et l'amortissement de l'installation, l'autre mobilière, figurée par la perte en énergie transportée ; et il semblait, aux premiers temps de l'électricité, que l'on ne pût être dégrevé de l'une d'elles que sous peine d'être accablé par l'autre : des transmissions peu coûteuses, par fils fins, entraînent d'un bout à l'autre de la ligne des pertes énormes de puissance, et, si l'on veut réduire ces pertes, on est amené à employer des câbles de cuivre de grande section et d'un prix exagéré.

Mais il faut se défier des dilemmes ; leur apparente rigueur laisse souvent oublier la troisième solution qui permet de passer entre leurs deux cornes, et c'est ici le cas. La perte d'énergie en cours de ligne augmente rapidement avec la quantité d'électricité transportée par seconde, qu'on appelle l'intensité du courant, et qu'on mesure en ampères. La question est, par suite, de savoir si l'on peut transporter une grande quantité d'énergie avec une faible intensité. Or il n'y a là rien d'impossible. L'énergie dépend de deux facteurs, l'intensité et la tension, cette dernière évaluée à l'aide d'une unité qui, du nom de Volta, le créateur de la pile, a été appelée volt ; si bien qu'un courant de 10 ampères sous 100 volts transporte autant d'énergie qu'un courant d'un ampère sous 1.000 volts. Il faudra donc recourir aux courants de haute tension, puisqu'eux seuls permettent de concilier les deux

termes du problème : emploi de conducteurs peu coûteux, faibles pertes d'énergie en ligne ; et nous arrivons, pour l'électricité, à la même solution que nous avons déjà reconnue nécessaire pour l'économie des transmissions hydrauliques ou pneumatiques.

Précisons ces notions par un exemple. Nous cherchons à transporter 100 chevaux-vapeur de Paris à Évreux, sur une distance de 108 kilomètres, avec une perte de 20 p. 100, c'est-à-dire de telle sorte que la génératrice, de 125 chevaux, placée à Paris, produise à Évreux une puissance de 100 chevaux. Si nous voulons effectuer le transport sous une tension de 100 volts, au départ, il faudra employer un cylindre de cuivre de 31 centimètres de diamètre, pesant 75.000 tonnes et coûtant 150 millions. Mais si l'on accepte pour le transport une tension initiale de 20.000 volts, le conducteur de cuivre n'aura plus que 1^{mm},6 de diamètre, un poids de 2.000 kilos et une valeur approximative de 4.000 francs. Bien entendu, les frais d'installation ne se limitent pas à cette somme, loin de là ; mais l'exemple choisi nous montre pourtant à quelles impossibilités financières on se heurterait, si l'on n'avait pas la liberté d'employer couramment, et d'une façon industrielle, les tensions élevées.

Cette liberté, la possède-t-on ? A coup sûr, puisque depuis quelques années on emploie cou-

ramment des tensions égales et même supérieures à 20 000 volts ; mais elle n'a été acquise qu'au prix de longues luttes. Sous ces formidables tensions, l'électricité a de plus en plus de tendance à s'échapper des conducteurs métalliques pour se frayer une voie, souvent meurtrière, à travers les corps voisins ; les conditions d'isolement doivent donc être minutieusement étudiées, non seulement pour la ligne, mais pour les dynamos, génératrice et motrice. En fait, l'établissement de dynamos capables de supporter ces hautes tensions eût soulevé de grandes difficultés¹, si, par fortune, le courant alternatif ne se fût trouvé là, prêt à fournir la solution du problème. Ici s'arrête l'œuvre de Marcel Deprez, et commence celle d'initiateurs aussi hardis, nos contemporains, qui sont Tesla, Gaulard, Elihu Thomson, Ferraris et d'autres encore. L'ère des précurseurs est finie, et c'est partout maintenant, au laboratoire et à l'usine, que se mènent les expériences ; il en est résulté ces deux instruments merveilleux qui sont l'alternateur polyphasé et le transformateur statique.

Faire du courant alternatif, dont le sens de

1. Cependant, un ingénieur suisse, M. Thury, est parvenu à rendre pratique l'emploi du courant continu à haute tension ; il a pu, à l'aide de dynamos accouplées, arriver jusqu'à 60.000 volts, et il a créé plusieurs installations industrielles dans lesquelles le courant continu résout, dans des conditions remarquables de fonctionnement, le problème de la transmission électrique de la puissance.

circulation s'intervertit un grand nombre de fois par seconde, est chose toute simple : tout circuit conducteur qui tourne dans le voisinage d'un aimant ou d'un électro-aimant, est le siège de semblables courants. L'alternateur, ou producteur de courants alternatifs, a donc logiquement précédé la dynamo génératrice de courant continu, mais il est resté sans application jusqu'au jour où la nécessité de réaliser de hautes tensions a appelé à la vie industrielle ce nouveau type de courant. L'alternateur peut en effet être construit pour des tensions élevées, atteignant plusieurs milliers de volts, et que les dynamos à courant continu ne sauraient supporter impunément. Et de plus, le transformateur statique permet, à volonté, d'élever ou d'abaisser cette tension. Son prototype, connu depuis longtemps dans les laboratoires, est la bobine de Ruhmkorff, dans laquelle un courant interrompu ou alternatif, circulant dans un gros fil, engendre dans un fil fin et long, enroulé parallèlement au premier, un courant alternatif de haute tension, capable de fournir ces étincelles qui sont pour beaucoup la seule forme sensible des phénomènes électriques. Le transformateur statique, invention géniale de ce pauvre Gaulard qui mourut misérable et presque inconnu, n'est que la transposition industrielle de ce classique appareil ; avec lui, par exemple, un courant alternatif de 100 ampères et 100 volts pourra

être transformé en courant alternatif ayant une tension cent fois plus grande, 10.000 volts, et une intensité cent fois moindre ; l'opération est automatique, l'appareil fonctionne sans surveillance, et pourtant avec une probité si scrupuleuse qu'il ne prélève pas plus de 3 p. 100 pour cette transformation d'énergie.

Ainsi, semble-t-il, nous touchons au but de nos efforts : les alternateurs produisent l'énergie électrique sous 1.500 ou 2.000 volts ; les transformateurs l'amènent à 10 ou 20.000 volts ; les fils de ligne la transportent économiquement ; de nouveaux transformateurs, placés aux points d'utilisation, abaissent sa tension à des valeurs moins dangereuses ; il ne reste plus qu'à en faire l'emploi. Là commencent par malheur de nouvelles difficultés ; — par bonheur, devrais-je dire, car l'ingéniosité humaine en a profité pour susciter des solutions nouvelles qui sans cela, peut-être, ne fussent point apparues.

L'alternateur, excellent comme générateur électrique, est médiocre comme moteur ; il est quinquex au démarrage, et souvent, en pleine marche, s'arrête, se « décroche » brusquement. Sans prétendre expliquer ce point par des raisonnements élémentaires, nous pouvons cependant comprendre qu'il s'agit, comme dans la machine à vapeur où le mouvement alternatif du piston est converti en rotation continue, d'engendrer une rotation avec le va-et-vient du

courant électrique; et, comme pour la machine à vapeur, il existe des points morts, qui sont ceux où le piston s'arrête aux deux bouts de sa course, tout pareillement ici il existe des moments où le courant, s'annulant avant de changer de sens, cesse d'agir pour entraîner le moteur; il faut donc que ce moteur ait acquis préalablement une vitesse qui lui permette de franchir les points morts, et même qu'il s'établisse entre les périodes d'alternances du courant et la vitesse du moteur une certaine concordance sans laquelle le sens de rotation tendrait à se renverser. Toutes ces conditions sont difficiles à réaliser, plus difficiles qu'avec la machine à vapeur, parce qu'ici le nombre des alternances est beaucoup plus rapide: une machine à vapeur en présentera 100 à 200 par minute, et un courant électrique alternatif en aura pratiquement 1.500 à 6.000 dans le même temps.

Voilà donc le problème des transmissions électriques, au moment d'être résolu, accroché à une difficulté nouvelle; mais notre comparaison, poursuivie jusqu'au bout, nous mettra sur la voie de la solution.

Comment, avec les machines à vapeur, arrive-t-on à éliminer l'action du point mort? En accouplant, sur le même arbre tournant, les bielles de plusieurs pistons dont les mouvements, de même sens et de même vitesse, soient cependant décalés les uns par rapport aux

autres, de telle sorte que, lorsqu'un des pistons passe par un point mort, les autres soient dans le plein de leur force et entraînent l'arbre au delà de cette position critique ; nombreuses sont aujourd'hui les applications de cette méthode, qui assure aux moteurs une vitesse plus régulière. C'est en application du même principe que le professeur italien Ferraris imagina d'associer plusieurs courants alternatifs décalés les uns par rapport aux autres, c'est-à-dire ne s'annulant pas en même temps ; deux de ces courants, dont l'un passe par son intensité maximum lorsque l'autre s'annule, constituent un système diphasé ; trois courants, s'annulant tour à tour à des intervalles de temps égaux, forment un système triphasé ; et si ces deux combinaisons sont à peu près *uniquement employées*, il ne serait pas malaisé d'en imaginer et d'en réaliser autant qu'on le voudrait.

Ces principes une fois posés, la réalisation pratique n'en soulève pas de grosses difficultés. L'alternateur ordinaire est tout prêt, avec quelques changements dans les connexions, à fournir du courant di ou triphasé ; trois fils de cuivre au lieu de deux, suffiront à conduire ce courant au point voulu, les transformateurs statiques s'adaptent parfaitement à cette combinaison ; enfin le moteur électrique di ou triphasé est un appareil sans reproche, robuste, industriel, d'un bon rendement, et qui échappe aux inconvénients du

moteur à courant alternatif simple. Il n'en a pas moins fallu, pour donner la vie industrielle à ces conceptions théoriques, créer tout un appareillage et réaliser ces expériences à grande échelle qui donnent la consécration aux travaux de laboratoire.

Dans cette œuvre, la Suisse s'est placée au tout premier rang, grâce sans doute à cet admirable Polytechnicum de Zurich, véritable pépinière d'ingénieurs et de savants : c'est par eux que Zurich est devenue, depuis quinze ans, pour les électriciens, comme une ville sainte, un lieu de pèlerinage où les fervents de l'électricité viennent s'initier à ses rites et contempler ses miracles. C'est à eux aussi que l'industrie européenne doit les mémorables expériences de Lauffen-Francfort, qui ont été, en 1891, pour le courant alternatif, ce que les expériences de Miesbach-Munich avaient été, neuf ans plus tôt, pour le courant continu. Une puissance de 300 chevaux, engendrée à Lauffen par un alternateur triphasé, était transportée à Francfort, à 175 kilomètres de là, sous une tension normale de 15 000 volts, qui put même sans aucun accident être portée à 30 000 ; la ligne était formée de trois fils de cuivre nu, portés sur des poteaux en bois, ayant un développement total de 530 kilomètres et pesant ensemble environ 60 000 kilogrammes ; le rendement de l'opération atteignit 74 p. 100, c'est-à-dire que sur 100 che-

vaux produits à Lauffen, 74 étaient récupérés à Francfort; et ces expériences, prolongées plusieurs mois de suite, pendant la durée de l'exposition, et étudiées par des ingénieurs venus de tous les pays, attestèrent le triomphe définitif des transports d'énergie à grande distance.

En même temps, sur l'autre face du globe, un peuple qui ne veut être distancé par aucun autre créait, non plus comme expérience, mais comme application permanente, la plus grandiose installation de captation et de distribution d'énergie qui puisse être rêvée, non pas tant par la distance parcourue que par la quantité d'énergie produite et distribuée : cinquante mille chevaux à l'origine, cent mille chevaux actuellement, c'est-à-dire une puissance égale à celle que produisent toutes les machines à vapeur d'une ville comme Paris. Je veux parler de l'utilisation des chutes du Niagara. On sait que cette énorme masse d'eau qui s'effondre dans un abîme de cinquante mètres de profondeur est la plus grande source d'énergie naturelle qui soit localisée en un point du monde; on peut évaluer à cinq millions de chevaux-vapeur la puissance engendrée par cette cataracte. Les Américains ont jugé qu'une telle énergie ne pouvait rester oisive en ce pays où tout le monde travaille, et, en 1891, une puissante Société, *The Cataract construction Company*, entreprit pour son utilisation des travaux qui devaient durer trois ans. Au bout

de ce temps un canal était creusé, qui dérivait, en amont de la chute, une partie des eaux du Niagara; ces eaux tombaient dans dix puits, profonds de 43 mètres, au fond desquels se trouvaient dix turbines; chacune d'elles, entraînée par la trombe d'eau, de douze mètres cubes par seconde, qui tombait sur ses aubes, dérobait à la cataracte une puissance de cinq mille chevaux, remontée par l'axe vertical de chaque turbine jusqu'au niveau du sol, où elle entraînait un générateur électrique de même puissance. Et cette puissance totale de cinquante mille chevaux, représentée par du courant diphasé à 2300 volts, était répandue sur toute la région dont elle centuplait la puissance industrielle; tout autour de Niagara Falls, elle créait une cité, aujourd'hui une des plus importantes de l'Union; puis, portée à 11 000 volts par des transformateurs statiques, elle partait sur une ligne de 43 kilomètres de long, jusqu'à Buffalo, où elle allait éclairer les rues, actionner les tramways et les usines, et, tout récemment encore, fournir la vie à l'Exposition panaméricaine.

Plus encore qu'une expérience d'exposition, la gigantesque entreprise du Niagara avait une portée économique, car elle ne démontrait pas seulement la possibilité industrielle des transports à grande distance; elle permettait d'en évaluer le prix de revient, d'établir le bilan de

toutes les entreprises analogues. Aussi est-ce depuis ce temps, qui n'est pas loin de nous, que les industriels ont été vraiment conquis ; tout le massif des Alpes s'est couvert d'une frondaison d'usines hydro-électriques, et l'on envisage avec une telle confiance l'emploi des tensions élevées, qu'une de ces sociétés espère pouvoir convoier jusqu'à Orléans la puissance empruntée aux torrents du Dauphiné.

Voilà où l'on en est aujourd'hui, treize ans après les expériences de Francfort, vingt-deux ans après celles de Munich. N'est-il pas visible, dès lors, que nous allons à une extrême diffusion de l'énergie, devenue si mobile, qu'elle est toujours prête à se porter partout où l'on a besoin d'elle, partout où s'offre une exploitation avantageuse ? La révolution économique qui s'accomplit ainsi sous nos yeux dans les conditions du travail n'est comparable qu'à celle qui s'est produite pour le capital, d'abord champ ou maison, puis pesante monnaie d'airain, puis monnaie d'argent et d'or, prenant enfin, sous forme de papier-monnaie et d'effets de commerce, une mobilité telle qu'un morceau de papier du poids de quelques grammes peut avoir autant de valeur qu'un pâté de maisons ou que tous les champs d'une commune. Et, de même qu'à la suite de cette mobilité donnée au capital, il s'est créé toute une classe de banquiers ou de capitalistes, vivant de la circulation et du travail de

leurs richesses, de même actuellement toute une nouvelle classe se forme d'hommes, banquiers d'énergie, qui s'occupent d'aménager nos chutes d'eau, de recueillir leur puissance et d'en trafiquer, la louant aux uns et aux autres au mieux de leurs intérêts.

* * *

Après ce qui vient d'être dit, on peut juger que nous sommes au bout de notre sujet, que l'humanité, en possession d'une solution définitive, n'a plus maintenant qu'à aménager son domaine suivant le plan dont nous venons de tracer les grandes lignes. Il est vraisemblable, en effet, que les choses vont se passer ainsi, et que nous sommes bien à une fin de chapitre ; mais nous ne sommes pas à la fin du livre, et déjà on voit poindre une chose nouvelle, par laquelle le transport de l'énergie pourrait bien se trouver, un jour à venir, encore une fois renouvelé : je veux parler des expériences de Hertz et de la télégraphie sans fil.

Heinrich Hertz mourut à trente-sept ans ; cette vie si courte lui a suffi pour immortaliser son nom par une découverte, la plus belle peut-être des temps modernes. Donnant un corps aux idées théoriques de Clerk Maxwell, Hertz a fait véritablement la synthèse de la lumière, et il l'a faite par des moyens si simples, qu'il n'est pas

de laboratoire où l'on ne puisse répéter ses expériences. Il fait éclater l'étincelle de la bobine de Ruhmkorff entre les deux extrémités rapprochées de deux crayons métalliques, terminés d'autre part par des sphères de cuivre. L'étincelle fournie par cet appareil, que Hertz nomme exciteur, présente un singulier caractère : elle est oscillante, c'est-à-dire qu'elle change de sens un grand nombre de fois par seconde ; chacune de ces périodes élémentaires faites d'un aller et d'un retour de la décharge, dure de un cinquante millionième à un cinquante trillionième de seconde, suivant les dimensions des appareils. Et ce qu'il y a d'important, c'est que les vibrations produites au point d'éclatement de l'étincelle se propagent de proche en proche dans l'espace environnant ; tel l'ébranlement produit par le va-et-vient d'un bâton plongé dans l'eau donne des ondes qui progressent à partir du centre d'ébranlement à la surface et dans l'intérieur du liquide. Ces ondes émises par l'exciteur constituent encore un phénomène électrique, car elles peuvent être saisies au passage par un léger cerceau métallique, interrompu en un point, et nommé résonateur ; au point d'interruption, on voit éclater des étincelles qui manifestent ainsi l'énergie transportée, à travers l'espace, de l'exciteur au point où se trouve le résonateur. Mais ces ondes ont déjà toutes les propriétés essentielles de la lumière : elles traversent

les milieux transparents, le vide, l'air, l'eau, l'huile, et sont arrêtées par les métaux, opaques pour elles comme pour les ondes lumineuses; elles se propagent dans l'espace avec la même vitesse que la lumière, soit 300 000 kilomètres par seconde; enfin, comme la lumière, elles peuvent être concentrées par un miroir parabolique semblable aux réflecteurs de nos phares, et dirigées en ligne droite dans une direction donnée. On obtient ainsi un rayon électrique comparable au rayon lumineux, capable comme lui d'être réfléchi par un miroir et renvoyé dans une autre direction, capable aussi d'être réfracté par un prisme et dispersé en formant un spectre.

Pourtant, ce rayon, notre œil ne le voit point, et il a fallu pour le révéler cet œil artificiel que nous avons nommé résonateur. Mais la lumière que nous voyons n'est qu'une fraction très petite de celle qui existe réellement; elle correspond à des vibrations de fréquence comprise entre 500 trillions par seconde, pour le rouge, et 730 trillions pour le violet; il en existe bien d'autres, beaucoup plus rapides ou plus lentes, et dont les instruments des physiciens, à défaut de notre œil, savent nous révéler l'existence. Les plus lentes de ces vibrations lumineuses connues sont encore deux cents fois plus rapides que les radiations électriques les plus brèves qu'on ait encore réalisées, mais il n'y a entre elles qu'une différence de degré, et on peut dire

que les vibrations électriques sont aux vibrations lumineuses ce que les larges vagues qui traversent les océans sont aux rides légères qui viennent frissonner à leur surface.

Malgré l'identité de leur nature, ces vagues de l'éther ont des propriétés qui varient d'une façon continue avec la fréquence de leurs vibrations; et parmi ces propriétés, il en est une, dont l'étude constitue une des plus précieuses contributions récentes de la science à la philosophie naturelle.

La lumière, dit-on, se propage en ligne droite. Cette propriété n'est qu'approximative, et un rayon lumineux possède, encore qu'à un degré très faible, le pouvoir de contourner les obstacles; c'est à ce phénomène qu'on a donné le nom de diffraction. La diffraction est d'autant plus prononcée que les vibrations considérées sont moins rapides; elle est donc plus grande pour le rouge que pour le violet, plus grande encore pour les radiations calorifiques ou infrarouges; enfin elle est beaucoup plus accentuée pour les vibrations électriques de Hertz. Ces vibrations pourront donc, en se propageant au niveau du sol ou de la mer, en suivre les sinuosités, contourner les vagues ou les collines et passer où un rayon lumineux aurait été arrêté; c'est là une des propriétés qui ont assuré le succès de la télégraphie sans fil, et qui font préférer pour cet objet des vibrations relativement

lentes. Ainsi, à mesure que les oscillations deviennent moins rapides, elles tendent à quitter la ligne droite pour épouser la surface des conducteurs. Plus lentes encore, elles pénètrent dans ces conducteurs et abandonnent le milieu isolant qui les entoure ; enfin, les courants alternatifs ordinaires, ou les courants continus, qui ne sont en définitive que du courant alternatif dont la période d'oscillation est infinie, se distribuent uniformément dans la masse même des conducteurs, où ils résident exclusivement. Une loi de progression continue relie donc des phénomènes qui semblaient tout d'abord entièrement différents, parce qu'on n'en connaissait que les apparences extrêmes, formées par les courants électriques ordinaires et la lumière visible.

Toutes ces idées fussent restées sans doute enfermées dans les laboratoires des physiciens si l'audace de Marconi ne leur eût trouvé une application pratique. Les radiations que la télégraphie sans fil expédie et recueille ainsi à travers des centaines de kilomètres, sont les mêmes que Hertz avait produites et dirigées dans les quelques mètres de sa salle d'expérience ; la seule différence, c'est qu'on a pu créer des excitateurs plus puissants, des résonateurs plus sensibles. Marchant un peu au hasard, car la théorie de ces vibrations éthérées est loin d'être achevée, on a réalisé ces communications lointaines que célèbre la presse quotidienne, mais à un prix

qu'il est nécessaire de signaler. Si on sait lancer, sans fil, de l'énergie dans l'espace, on ne sait pas mieux que Hertz la diriger; émanée de mâts conducteurs, ou antennes, reliés aux appareils d'émission, elle va où elle veut, comme elle le peut; sans doute elle s'étend comme une large nappe suivant à peu près la surface du sol ou de la mer; elle ne progresse donc qu'à condition de se disséminer. L'énergie qu'on peut recueillir en un point donné n'est par suite, à grande distance, qu'une fraction insignifiante de celle émise au départ; l'étincelle de l'excitateur représente, pendant sa très courte durée, une puissance de plusieurs chevaux-vapeur, et pourtant l'onde transmise à quelques dizaines de kilomètres de là est si faible que, sans l'admirable sensibilité des récepteurs, elle n'eût jamais pu être décelée; elle possède, par bonheur, la propriété de rendre momentanément conducteur un petit cylindre de limailles métalliques, faiblement tassées et enfermées dans un tube de verre. Cette propriété, découverte par M. Branly, permet de déceler au passage ces ondes minuscules. Le tube à limaille, ou cohéreur, ferme un circuit comprenant une pile et un récepteur télégraphique ordinaire; au passage de l'onde, le cohéreur, devenu subitement conducteur, cesse d'arrêter le courant de la pile qui actionne le récepteur; un signal est ainsi enregistré, mais il est visible que l'énergie, pourtant minime,

nécessaire à cette inscription, n'a pas été fournie par l'onde transmise, mais par la pile; le cohéreur a fonctionné comme relai, c'est-à-dire qu'il a seulement produit le déclenchement qui a mis en marche le système inscripteur.

On n'en demande pas plus, si le but qu'on se propose est la télégraphie sans fil : les considérations de rendement sont alors sans valeur et l'essentiel est d'assurer par un moyen quelconque la réception des signaux. Mais il est vraisemblable qu'on ne s'en tiendra pas là. Les courants électriques, jusqu'au milieu du XIX^e siècle, ne semblèrent bons eux aussi qu'à la télégraphie, et il eût alors semblé ridicule de leur confier le transport d'une énergie appréciable; ils ont montré depuis de quoi ils étaient capables. Tout pareillement, les ondes électriques transmises sans conducteur à travers l'espace s'essayent pour l'instant à la transmission des signaux, mais nous sommes loin d'avoir épuisé leurs propriétés; déjà M. Tesla les a employées, bien que d'une façon encore peu pratique, à produire la lumière, en plaçant sur leur chemin des tubes contenant des gaz raréfiés, qui rayonnent alors une lueur phosphorescente. Un jour viendra, sans doute, où l'on saura, mieux qu'aujourd'hui, les diriger, soit qu'on les laisse glisser le long d'un fil conducteur si ténu qu'il ne servira que de guide, soit au contraire qu'employant des vibrations presque aussi rapides que celles de la lumière,

on les laisse jaillir en ligne droite, quitte à les renvoyer par réflexion dans les directions choisies¹. Ce jour-là, on aura su créer tout un appareillage industriel, qui ne ressemblera guère sans doute à celui d'aujourd'hui, pour émettre les radiations choisies, et aussi des récepteurs appropriés pour transformer en travail mécanique l'énergie vibratoire qui leur parviendra à travers l'espace. Nous sommes très loin de ce but, mais qui peut dire aujourd'hui qu'il soit inaccessible ? Il paraît en tout cas être dans l'ordre logique du développement humain.

Maintenant que nous avons suivi le chemin tracé par le labeur des savants dans le passé, et que nous avons jeté un regard sur le sentier à peine frayé qui se dirige vers l'avenir, nous pouvons juger combien, par la logique même des choses, le progrès s'est fait et se poursuit en droite ligne.

Le transport de l'énergie est allé se délivrant progressivement de toute entrave matérielle, se dématérialisant, si l'on peut dire.

D'abord on utilise les solides rigides, les arbres de transmission, les engrenages, puis les solides élastiques et déformables, les courroies

1. A l'Exposition universelle de Saint-Louis, un concours a été ouvert et un prix réservé à l'inventeur qui saura communiquer, de la terre à un ballon placé dans un rayon déterminé, une puissance suffisante pour assurer la translation de cet aérostat.

et les câbles téléodynamiques. Plus tard, le problème de la transmission et de la distribution de l'énergie est résolu à l'aide des liquides, c'est-à-dire de l'eau, puis au moyen des gaz, autrement dit de l'air sous pression. Tous ces procédés ont un caractère commun : le transport d'énergie est toujours accompagné d'un mouvement de matière ; les arbres, les engrenages, les courroies tournent, les câbles glissent sur leurs galets ; l'eau ou l'air cheminent dans des tuyaux, transportant l'énergie attachée à leur substance.

Avec l'électricité commence un nouveau stade : plus de transport de matière qui accompagne le transport d'énergie ; les fils de bronze qui relient les stations génératrices et réceptrices sont immobiles, et si leur présence matérielle est nécessaire au transport, on peut réduire la quantité de matière employée jusqu'à des limites insoupçonnées il y a peu d'années ; nous verrons peut-être un jour, selon la prophétie de Tesla, la puissance entière du Niagara conduite à New-York sur un câble métallique du diamètre de nos fils télégraphiques.

Mais nos successeurs verront peut-être autre chose encore : sans fils, ou avec des fils si ténus qu'à peine ils seront visibles, l'énergie progressera à travers l'espace, au-dessus du sol, et sans doute avec un rendement meilleur qu'aujourd'hui, car à mesure que moins de matière est mise en mouvement, les pertes par frotte-

ment diminuent. Ce jour-là, l'éther qui baigne les mondes sera le grand, l'unique convoyeur de puissance, assez parfait peut-être pour qu'il soit indifférent de capter l'énergie ici ou là, de l'utiliser en un point ou en un autre ; mais cet état de perfection représente un idéal vers lequel la science et l'industrie tendront sans jamais l'atteindre.

Jusqu'ici, l'humanité a marché presque en aveugle à la recherche d'une solution meilleure, et ce n'est guère que d'aujourd'hui qu'on peut comprendre la logique inconsciente qui l'a guidée sur sa route. Car la solution vers laquelle elle marche est celle-là même que la nature emploie depuis l'origine des temps : c'est par des vibrations infiniment rapides de l'éther que l'énergie progresse dans les espaces interplanétaires ; c'est par là que la radiation solaire qui alimente la puissance de notre monde, nous arrive, en quantité colossale, puisqu'elle serait capable de fondre chaque année une couche de glace de cinquante mètres d'épaisseur. Il était donc dans l'ordre des choses que le mécanisme par lequel la nature effectue le transport de l'énergie dans l'univers, fût également celui que l'homme, mieux informé, serait amené à choisir, pour résoudre à son tour le même problème.

Quel que soit le sens de l'évolution qui se prépare, les hommes des siècles à venir n'oublieront pas, sans doute, la période de cent cinquante

ans que nous venons de parcourir et dans laquelle la science a donné à l'organisation sociale un si prodigieux élan; l'époque où, après tant de siècles de tâtonnements et d'indolence, les termes du problème se sont précisés, où tant de solutions ont subi tour à tour l'épreuve de l'expérience; ils l'oublieront d'autant moins que l'évolution qui s'accomplit n'est pas seulement d'ordre matériel, mais d'ordre social et intellectuel, et que c'est elle, mieux que tous les discours, qui fera de l'homme, au lieu de la brute attachée à la terre, le conducteur conscient de toutes les forces de la nature.

LES ALPES INDUSTRIELLES

Les Alpes ne sont pas seulement un merveilleux décor. A ne les voir qu'avec des yeux d'artiste, à regarder ces cimes neigeuses où la vie semble s'arrêter, on risquerait d'oublier qu'elles sont les sources mêmes de la vie que le conflit des éléments élabore sur le chaos de leurs sommets. Placées comme un mur de glace entre les vapeurs qui s'élèvent de la Méditerranée et celles qui sortent des plaines humides de l'Europe centrale, elles jouent le rôle d'un gigantesque condenseur. Sans cesse, des régions plus tièdes et plus basses, les vents leur ramènent l'air presque saturé qui, en lèchant leurs sommets, en tourbillonnant dans leurs vallées, se refroidit et abandonne, sous forme de neige ou de pluie, l'eau que la chaleur solaire avait volatilisée et soulevée jusqu'à leurs sommets. La chute des eaux est donc abondante dans les Alpes, plus qu'en toute autre région ; en moyenne, il tombe,

à surface égale, trois fois plus d'eau sur leurs sommets que sur les plaines qui les entourent. Et c'est pour cela qu'elles forment la source et le principal aliment des fleuves de l'Europe centrale, le Rhin, le Rhône, le Pô, l'Adige, les grands affluents du Danube.

La pente rapide de ces cours d'eau et la variation des pluies avec les saisons donneraient sans doute aux rivières descendues des Alpes un débit très irrégulier, presque nul en été, excessif en automne et au printemps, comme il arrive pour celles qui descendent du Plateau central, si certaines causes n'agissaient pour régulariser ce débit. Telle est, d'abord, l'existence des glaciers qui retiennent en hiver l'eau surabondante pour la laisser couler aux chaleurs de l'été. Plus bas, les forêts et toute la terre humide et spongieuse que maintient l'enchevêtrement de leurs racines jouent un rôle analogue, et de fait, il est avéré aujourd'hui que les régions déboisées des montagnes sont celles où le régime torrentiel est le plus accentué. Mais surtout, les eaux écoulées des Alpes ont un régulateur très efficace, constitué par les lacs qui leur servent de trop-plein pendant les crues, de réservoir pendant les sécheresses. Ces grands lacs forment vraiment la caractéristique de l'hydraulique alpine ; suspendus à des niveaux compris entre 300 et 500 mètres ; ils partagent chacun des fleuves qui les traversent en deux

parties bien distinctes : l'étiage supérieur où, sur des pentes très accusées, dévalent des eaux torrentueuses, irrégulières dans leur débit, souvent mélangées de limon et de débris de toute sorte ; et l'étiage inférieur où la pente, moins prononcée, s'infléchit peu à peu jusqu'à l'horizontale, où les eaux décantées par le séjour dans les lacs, sont plus claires, où le débit est peu variable.

*
* *

Cette circulation continue des eaux fait des Alpes une des plus grandes sources d'énergie naturelle qui existent sur le globe, d'autant plus précieuse qu'elle est placée au cœur même du vieux monde civilisé. Chaque litre d'eau qui coule d'un mètre de hauteur, effectue par sa chute un travail d'un kilogrammètre, et le filet liquide qui glisse, avec un débit d'un litre par seconde, sur une pente de 75 mètres de haut, représente une puissance d'un cheval-vapeur.

Il semble, d'après cela, que rien ne soit plus facile que d'évaluer la puissance mécanique d'un cours d'eau, puisqu'il suffit, pour l'obtenir en chevaux-vapeur, de diviser par 75 le produit de deux facteurs, dont l'un est la hauteur de chute en mètres, et l'autre le débit en litres par seconde. Mais le débit est chose variable suivant les saisons, et même suivant les années. Toutefois,

lorsqu'on a en vue les applications industrielles continues, c'est sur le débit minimum moyen des trois mois secs qu'il importe de se régler, sans oublier que les neuf autres mois la puissance disponible sera presque double de cette valeur, et d'autre part que des travaux d'appropriation permettent souvent, en régularisant le débit, d'accroître grandement cette puissance minimum.

En fait, il règne encore aujourd'hui, dans l'évaluation de la puissance hydraulique des cours d'eau, une incertitude dont les deux exemples suivants pourront donner une idée : un petit cours d'eau tributaire du lac de Genève, l'Avançon, est porté sur la statistique dressée par l'ingénieur suisse Lauterburg, comme possédant une puissance utilisable de 285 chevaux, ce qui n'a pas empêché la Société des forces motrices de l'Avançon de construire une usine hydro-électrique dont la puissance, empruntée tout entière à ce cours d'eau, ne descend pas au-dessous de 1.300 chevaux, et est supérieure à 3.000 pendant neuf mois de l'année.

Tout pareillement, les disponibilités hydrauliques de l'état de Genève sont évaluées, dans la même statistique, à 7.655 chevaux 9. Que ces neuf dixièmes de cheval ne nous donnent pas trop d'illusions sur la précision du nombre ; en effet, l'état de Genève, sur l'active impulsion de M. Turrettini, a installé successivement sur le

Rhône depuis 1886 trois usines, à la Coulouvrenière, puis à Chèvres, enfin à la Plaine, dont la puissance totale atteint 30.000 chevaux.

Inversement, d'autres évaluations, fantaisistes par excès, supposent effectués des travaux d'aménagement dispendieux, ou reposent sur une évaluation optimiste du débit; si bien qu'actuellement encore, nul n'est en état de répondre, même avec une demi-précision, à cette question, pourtant si importante : quelle est la force motrice disponible et utilisable dans les quatre pays qui se partagent les Alpes, la France, la Suisse, l'Italie et l'Autriche. L'intérêt évident de chaque état à résoudre, pour son compte, le problème, a amené la nomination de commissions qui procèdent à leur enquête avec une lenteur et un scrupule administratifs. Toutefois, une enquête préliminaire, menée par M. l'ingénieur Tavernier¹, nous a déjà fourni quelques éléments d'appréciation, et c'est à elle que nous emprunterons, pour une bonne part, les renseignements utilisés dans cet article.

Il est clair, tout d'abord, que la statistique doit nécessairement négliger les minuscules filets d'eau qui ruissellent sur toutes les pentes, mais dont la puissance est inutilisable. On a été, dans cette voie, jusqu'à laisser délibérément de côté toutes les forces hydrauliques, inférieures

1. Les forces hydrauliques des Alpes en France, en Italie et en Suisse, 1900.

à 200 chevaux, et cela d'un accord commun entre tous les statisticiens, ce qui indique bien que l'ère des vieux moulins est terminée et que seule la captation des grandes énergies hydrauliques présente de l'intérêt.

Adoptons cette limite inférieure, et délimitons la région qui nous intéresse, pour la France, par les frontières italienne et suisse et par le cours du Rhône, en y comprenant ce dernier fleuve, soit une superficie de 56.000 kilomètres carrés, comprenant dix départements. Dans ces conditions, la richesse hydraulique minimum des Alpes françaises paraît voisine de 4 millions de chevaux. En tenant compte de la perte inévitable des organes de transformation, elle équivaut à 3 millions de chevaux à prendre sur l'axe des turbines, si elle était tout entière aménagée; pendant neuf mois de l'année, on pourrait disposer d'une puissance sensiblement double.

Dans les mêmes conditions, il est présumable que la puissance hydraulique, transformée en énergie mécanique, serait sensiblement supérieure pour la Suisse et l'Italie et pourrait être estimée à 4 millions de chevaux pour chacune, et à 2 millions pour l'Autriche. On se trouve donc en présence d'une énergie permanente, mise à notre disposition par les Alpes, voisine de 13 millions de chevaux, dont 1 million à peu près est actuellement exploité, à peu près en parties égales, par la France, la Suisse et l'Italie.

Essayons de donner un peu de vie à ces chiffres. A cette richesse, encore à peine utilisée, on ne saurait trouver de meilleur terme de comparaison que les bassins houillers qui, depuis un siècle, ont alimenté la vie industrielle des peuples civilisés. Occupons-nous seulement de la France : pour entretenir la puissance de 3 millions de chevaux contenus dans les Alpes françaises, il faudrait, avec les machines à vapeur actuellement en usage, une consommation annuelle de 17 millions de tonnes de houille; c'est à peu près ce que les 60.000 mineurs du Pas-de-Calais extraient annuellement des mines les plus riches de notre pays. Ainsi, aux deux pôles de la France, les montagnes du Sud-Est et les plaines du Nord, si dissemblables d'aspect, ont été dotées par la nature de puissances industrielles équivalentes, avec cette différence pourtant que les richesses hydrauliques sont inépuisables, et que la majeure partie de la houille extraite du sol étant employée au chauffage domestique est, en fait, inutile au développement industriel du pays.

Mais poursuivons notre parallèle. Les puissances naturelles, d'où qu'elles viennent, ne sont jamais gratuites. Il a fallu des capitaux pour mettre en exploitation les gisements houillers, comme il en faudra pour aménager les forces hydrauliques. Pour être mises en état de produire du travail industriel, certaines chutes pri-

vilégiées coûtent moins de cent francs par cheval, tandis que le prix des autres atteint plusieurs milliers de francs, comme le cas s'est produit pour la grande dérivation prise sur le Rhône à Jonage près de Lyon.

Il est vraisemblable qu'une somme égale au moins à un milliard sera nécessaire pour aménager les chutes des Alpes; l'avenir seul se chargera de nous dire si cet aménagement pourra être intégral, ou si une fraction seule des chutes, un tiers par exemple, se prête à une exploitation profitable. Même réduit à ces proportions, le problème économique qui se pose à nos contemporains est d'assez grosse importance pour retenir leur attention.

Quoi qu'il en soit, les résultats acquis aujourd'hui permettent d'affirmer ceci : c'est qu'actuellement la force motrice mécanique, c'est-à-dire celle qu'on recueille sur l'axe des turbines, est vendue couramment dans les Alpes à un prix tel qu'il faudrait, pour en obtenir l'équivalent au même lieu avec des machines à vapeur, que le charbon y coûtât de 6 à 12 francs la tonne. De pareils prix ne se pratiquent qu'en Angleterre et en Amérique, au pied des gisements les plus riches. Mais les conditions économiques du problème sont tellement complexes qu'il faudrait se garder de tirer de ces chiffres des conclusions hâtives; telle chute, très facile à aménager, mais perdue au fond des Alpes, pourra être

moins profitable à exploiter que telle autre, nécessitant des travaux plus onéreux, mais située à portée d'agglomérations importantes; ou bien une installation hydraulique, coûteuse par elle-même, pourra utilement venir en corollaire de travaux d'intérêt public facilitant la navigation ou l'irrigation agricole.

*
* *

On peut s'étonner, à première vue, que les hommes aient laissé si longtemps inemployée cette puissance presque illimitée qui s'écoule des montagnes, au milieu des plus anciennes civilisations du monde et à portée des peuples les plus industriels. Les moulins à eau sont connus depuis vingt siècles, et pourtant il n'y a guère plus de vingt ans que les régions alpines ont pris un essor que la nature semblait avoir préparé; mais tout se tient dans l'industrie, et la grande usine hydro-électrique n'était possible qu'avec les progrès de la construction mécanique, de la métallurgie, de l'hydraulique industrielle et surtout de l'électricité. Cela est tellement vrai que les précurseurs, ceux qui ont créé à Bellegarde des installations de plusieurs milliers de chevaux, ont vu pendant une longue suite d'années les forces aménagées par eux rester inemployées, malgré l'emploi des transmissions télédynamiques.

Mais en faisant la part des fatalités économiques, il faut aussi rendre hommage à ceux qui ont ouvert la voie : à M. Turretini pour les admirables installations hydro-électriques de Genève, et surtout à M. Bergès, dont les installations de Lancey, poursuivies avec une logique admirable pendant vingt-cinq ans, ont montré comment devait se faire l'utilisation rationnelle de hautes chutes. C'est là, à Genève et à Lancey, qu'il faut aller chercher les deux prototypes des installations hydrauliques.

A Genève, comme partout où on dispose de grandes masses d'eau coulant sur une pente modérée, la chute est créée soit par un barrage établi sur le fleuve même, soit par un canal dérivé dont la pente, juste suffisante pour déterminer l'écoulement des eaux, les amène sous l'usine génératrice, où elles tombent au bief inférieur, entraînant les turbines, et par elles, les dynamos productrices d'énergie électrique. Ceux qui ont créé les installations de ce type ont surtout rencontré des difficultés financières; il s'agissait, avant tout, de savoir si le prix relativement élevé de semblables travaux serait suffisamment rémunéré par la valeur du travail engendré. La chose a pu, à Genève comme à Jonage et aux chutes du Niagara, sembler longtemps douteuse.

Mais ceux qui ont créé les installations des hautes chutes ont eu à lutter contre des difficul-

tés techniques insoupçonnées. Les torrents des Alpes ne sont en rien comparables aux fleuves, assagis par la traversée des lacs, qui écoulent avec régularité des eaux transparentes. Aux grandes pluies d'automne, et surtout lors de la fonte des neiges, leur fougue est terrible ; ils sont faits, non plus d'eau, mais de boue, de pierres, de débris végétaux, de neige mi-fondu, le tout roulant pêle-mêle avec une puissance prodigieuse. Il a fallu tout d'abord établir, à l'origine de la chute, un solide barrage en maçonnerie constituant un bassin de décantation ; des trappes à gravier, situées à l'embouchure de la prise d'eau, et souvent complétées par des chasse-pierres, arrêtent ce qui serait de nature à endommager les turbines, tandis que la masse, encore boueuse, des eaux du torrent s'engage dans un tuyau d'acier accroché aux flancs de la montagne, et dont la résistance est graduée avec la pression exercée sur ses parois. Des vannes servent à régler l'arrivée de l'eau dans les turbines, placées en dessous ou à côté des dynamos, par lesquelles la puissance de la chute est invariablement transformée en énergie électrique. Ainsi des milliers de chevaux peuvent être engendrés par des filets d'eau dont le débit atteint à peine quelques centaines de litres par seconde, mais dont la hauteur de chute peut atteindre jusqu'à cinq et six cents mètres ; ces filets d'eau compensent la faiblesse de leur débit par la

vitesse qu'ils acquièrent en glissant dans leur corset d'acier; cette vitesse est telle, qu'il est impossible à un homme robuste de couper avec un sabre le jet liquide qui s'échappe au bas des conduites.

C'est sous le type que nous venons de décrire que la puissance des eaux alpines peut être aménagée avec le plus d'économie; complété par le transport électrique de l'énergie, il constitue un harmonieux ensemble industriel dont nous pouvons tout attendre pour la transformation des pays de montagne.

*
*
*

Il nous faut maintenant pousser plus avant, et chercher des emplois à cette énergie. Elle est évidemment applicable à toute espèce d'industries, mais en fait, certaines seront privilégiées : ce sont celles pour lesquelles une force motrice économique est une condition *sine qua non* d'existence, et qui, par ailleurs, ne sont pas soumises pour l'acquisition des matières premières et l'écoulement de leurs produits, à des transports trop onéreux. C'est ainsi que l'industrie du papier a pu prospérer dans la Savoie et le Dauphiné, parce qu'elle trouve dans les forêts la cellulose nécessaire à la fabrication de la pâte, et que l'énergie fournie par les chutes permet dans des conditions économiques la trituration

mécanique et le blanchiment électrolytique.

L'ensemble des industries électrochimiques a pris aussi dans les Alpes un prodigieux essor. Mais en laissant de côté ce groupe d'applications, auquel une étude spéciale est consacrée dans le présent ouvrage, les puissances hydro-électriques des Alpes ont encore d'autres emplois.

L'éclairage tout d'abord : c'est un émerveillement pour le touriste qui parcourt, le soir, la riche vallée du Grésivaudan, ou bien les cantons suisses, d'y voir les moindres villages et des chaumières presque misérables éclairés à l'électricité mieux que ne le sont, d'ordinaire, nos villes françaises; et il reste frappé du confort que la science moderne a introduit dans des régions restées jusqu'alors presque en dehors de la civilisation. C'est là une œuvre sociale d'une portée considérable; la lumière mise à la portée de tous accroît la partie utile de la vie, elle entraîne le désir du confortable et donne l'énergie nécessaire pour le conquérir; les heures prises au sommeil, aux stériles veillées d'hiver, sont gagnées par la lecture; ainsi le progrès intellectuel et moral résulte d'une transformation d'ordre matériel.

Mais le rôle social de la moderne usine hydro-électrique ne s'arrête pas là : l'électricité est merveilleusement appropriée aux industries de transport, surtout dans les pays de montagne

où l'existence de fortes rampes et de courbes très accentuées astreint à l'emploi d'un moteur à la fois très souple et très puissant. Le tracteur électrique est seul approprié à ce rôle ; recevant sa puissance de conducteurs parallèles aux rails, il a des dimensions et un poids singulièrement restreints, qui permettent de le placer sur des voies étroites, tout en lui donnant une grande puissance ; il obéit instantanément à la main qui le guide ; enfin l'énergie qu'il consomme, jamais inutilement, est engendrée avec économie par les chutes avoisinantes. C'est ainsi que les milliers de touristes que chaque été ramène autour du mont Blanc connaissent et utilisent le chemin de fer électrique du Fayet à Chamonix. Sur un trajet de dix-neuf kilomètres, comportant des rampes de 8 centimètres par mètre, circulent de confortables voitures dont chacune est automotrice. Le courant électrique qu'engendrent deux usines de 1.200 chevaux entretenues par les chutes de l'Arve, circule le long de la voie dans un rail isolé qu'un patin frotteur relie à la voiture ; ainsi se trouve assuré, par un dispositif très analogue à celui de nos tramways urbains, le transport des voyageurs et des marchandises sur la ligne la plus accidentée de la compagnie P. L. M.



Après avoir énuméré les principales applications possibles des puissances alpines, il est intéressant d'en faire, si on peut dire, le classement géographique, de voir comment elles se sont réparties sur la surface des Alpes et quelles raisons, naturelles et artificielles, ont déterminé cette répartition. Nous aboutirons ainsi à une notion d'un caractère général : c'est qu'à voir les choses de haut, et à négliger les détails, les États qui se partagent les Alpes ont tiré chacun un parti bien différent de leur puissance.

En France, et aussi un peu en Autriche, l'électrochimie est la reine des Alpes ; les usines de carbure de calcium, d'aluminium, de soude, de chlorate de potasse, y pullulent, et chacune d'elles, escomptant largement l'avenir, a aménagé des forces motrices de plusieurs milliers de chevaux ; c'est véritablement le triomphe de l'initiative individuelle, et on se sent un peu en Amérique dans ces Alpes françaises où une industrie, née d'hier, dépense sans compter nos richesses hydrauliques, où tant d'espérances se mêlent à tant de chimères ou de spéculations.

A cette mainmise des industries électrochimiques sur nos chutes des Alpes, il y a plusieurs

raisons ; une des meilleures sans doute est la raison historique ; l'électrochimie est surtout une science française, et il était naturel que le pays auquel elle doit ses premières découvertes, en reçût les premières applications. Mais aussi, il ne faut pas oublier que nos Alpes étaient il y a vingt ans, et sont encore actuellement, un pays pauvre, peu peuplé, à peine connu des touristes, et, par suite, il était logique que les applications d'ordre social y fussent plus rares qu'ailleurs, étant moins rémunératrices ; elles commencent pourtant à se dessiner aujourd'hui que nos Alpes sont mieux connues et plus fréquentées, et que les transports à grande distance permettent de desservir des régions plus peuplées et plus fertiles ; c'est ainsi que, sur les rocs dénudés des montagnes, apparaissent d'abord des lichens, puis des mousses, puis d'autres plantes qui transforment leur surface, élaborent le sol arable et préparent la voie à des cultures rémunératrices.

Les choses ont tourné d'une façon toute différente dans les cantons suisses ; l'Helvétie est depuis cinquante ans la terre classique du tourisme ; chaque année, plus d'un million d'étrangers viennent y chercher le plaisir ou la santé ; aussi la Suisse est-elle tout entière organisée en vue de ses visiteurs ; les choses se sont aggravées, si l'on peut dire, depuis les temps déjà lointains où Tartarin dénonçait les artifices de la « com-

pagnie » ; de vastes caravansérails, éblouissants de lumière, s'étagent sur toutes les montagnes, et des chemins de fer à crémaillère permettent aux moins ingambes l'accès de tous les points de vue. Ajoutez à cela la haute civilisation du peuple suisse, son amour du confortable intérieur, l'intérêt qu'il porte à l'organisation communale, et vous comprendrez aisément que les chutes d'eau devaient trouver en Suisse des applications très rémunératrices dans l'éclairage et la traction. Aussi, peu d'usines électrochimiques, mais, dans les moindres villages, l'éclairage électrique largement répandu ; et dans les régions les plus fréquentées des touristes, qui sont aussi les plus riches en chutes, de grandes usines hydro-électriques pour l'éclairage des villes et des grands hôtels, et pour la traction des trains de montagne. Ainsi, la Suisse a trouvé le mode d'utilisation des forces hydrauliques qui lui convient le mieux et, si on ne considère que les bénéfices matériels, sa part n'aura pas été la plus mauvaise.

Pour l'Italie, la situation était toute différente ; les larges plaines du Pô retiennent peu de touristes ; elles sont avant tout agricoles et industrielles. Tout un chapelet de grandes cités, Gênes, Coni, Alexandrie, Turin, Novare, Milan, Bergame, Brescia, s'égrène à peu de distance des Alpes ; la population la plus industrielle de l'Italie se masse dans cette surface, à peu près

égale à celle de la région française comprise entre la frontière, le Rhône et la mer, que nous avons précédemment délimitée; alors que la population kilométrique pour nos dix départements alpins ne dépasse pas 62 habitants par kilomètre carré, et 72 pour la Suisse, elle atteint 135 habitants pour les onze provinces italiennes limitrophes des Alpes.

A cela, il faut encore ajouter deux choses; d'abord le prix élevé du charbon; ensuite l'admirable valeur économique des puissances hydrauliques dans les Alpes italiennes; les cours d'eau qui aboutissent au Pô ont des pentes excessives, très supérieures en moyenne à celle des cours d'eau français ou suisses; les versants italiens des Alpes, granitiques et imperméables, reçoivent des pluies plus abondantes que les autres versants, et les conduisent, sans déperdition par l'intérieur du sol, à une multitude de torrents; enfin une admirable série de lacs régularise le débit des cours d'eau qui les traversent, et y rend commodes ces installations à grand débit dont les usines génevoises ont fourni le prototype.

Aussi, tout semble destiner l'Italie du Nord aux grands transports de force; des usines hydro-électriques se créent partout le long de la Dora, de la Stura, de la Sesia, du Ticino, de l'Adda, du Chiese, et leur puissance, convertie en courant à haute tension, s'en va porter la lumière et

la force jusqu'aux centres urbains qui pullulent dans la plaine lombarde.

Mais l'Italie, plus prévoyante que d'autres États, ne s'est pas contentée de ce brillant avenir; elle a voulu aider la fortune; elle s'est dit qu'une législation intelligente devait s'adapter à la situation économique nouvelle créée par la science, et aussi que la puissance sociale n'avait pas le droit de se désintéresser de ce qui allait advenir: les fatalités industrielles sont comme les cours d'eau; sans changer leur direction générale, on peut cependant les aménager de façon à rendre profitable une puissance qui, autrement, ne se fut peut-être manifestée que par des désastres. Tout pareillement, les Italiens ont pensé que l'évolution qui se dessinait devait être, pour le plus grand profit de tous, guidée par une législation appropriée. Déjà, une loi de 1884 sur « la dérivation des eaux publiques » affirmait les droits de l'État sur les chutes; elle fixait à trente ans la durée maximum des concessions, et stipulait les garanties et les redevances exigées du concessionnaire. Mais, en face d'une situation que chaque jour vient modifier, la législation doit plutôt être écrite sur des tablettes de cire que gravée sur des tables de bronze; aussi, l'administration italienne a-t-elle, par une suite de règlements et de circulaires, modifié au jour le jour cette loi fondamentale d'après les éléments que la pratique lui fournissait; enfin,

en 1898, elle confiait à une commission composée de hauts fonctionnaires et de représentants des compagnies de chemins de fer, le soin de préparer la modification de la loi de 1884, de façon à assurer l'exploitation la plus profitable des richesses hydrauliques et à garantir, mieux encore que par le passé, le droit social d'utiliser ces richesses pour le bien commun.

Des discussions qui se sont produites à cette occasion, il est sorti mieux encore qu'un projet de loi : une idée fondamentale a été dégagée, et une grande expérience a été entreprise. L'Italie a vu clairement qu'elle ne devait pas laisser gaspiller ses chutes d'eau, mais qu'elle devait au moins se conserver la possibilité d'en aménager une partie, pour assurer la traction électrique des trains dans la partie septentrionale de la Péninsule. Il reste douteux encore que cette modification soit applicable avec profit aux lignes principales, mais en tous cas il paraît assuré qu'elle doit donner des résultats excellents sur les lignes secondaires : celles-ci, en effet, parcourues une ou deux fois par jour par des trains de plusieurs voitures qui circulent presque à vide, sont loin de remplir tout le rôle social qu'on doit attendre d'elles ; il en serait tout autrement si elles étaient desservies plus fréquemment par des voitures automotrices ; le drainage des voyageurs et des marchandises se trouverait assuré dans des conditions méthodi-

ques qui se traduiraient à bref délai par un accroissement de profit. Or, les locomotives actuelles, entraînant avec leur tender un poids mort considérable, sont hors d'état d'assurer économiquement un tel service ; seule l'électricité est à même de le faire quand des installations hydrauliques permettent de l'engendrer à bon compte.

En conséquence, et comme il importe de sérier les questions pour les mieux résoudre, l'Italie s'est décidée, la première des puissances alpines, à une grande expérience. Elle a aménagé électriquement deux lignes : l'une, celle de Bologne à San Felice, longue de 42 kilomètres, où est essayée méthodiquement la traction par accumulateurs ; l'autre, plus importante encore, dans la Valteline, aux abords du lac de Côme. Celle-ci a 106 kilomètres de développement, et la puissance lui est fournie par trois turbines, de 2.000 chevaux chacune, reliées à des alternateurs qui produisent le courant sous la tension de 20.000 volts ; ce courant est ensuite amené à neuf sous-stations où sa tension est réduite ; ainsi transformé, il circule au-dessus de la voie dans des fils de cuivre semblables à ceux de nos tramways, et passe de là dans la voiture, puis dans les rails par où il retourne à son point de départ. Les trains sont constitués par une voiture automotrice, disposant d'une puissance de trois cents chevaux, et pou-

vant remorquer à sa suite jusqu'à quatre voitures ordinaires. Toute cette installation, admirablement comprise au point de vue technique, est en outre d'un confortable inconnu sur les autres chemins de fer d'Europe. Comme on n'a pas oublié qu'il s'agissait d'une expérience, une administration et une comptabilité spéciales ont été créées pour cette ligne. Ainsi, d'ici à quelques années, on sera pleinement renseigné sur les conditions dans lesquelles l'électricité pourra être appliquée aux lignes à médiocre trafic¹; des essais poursuivis concurremment en Prusse

1. Déjà, on a pu faire les constatations suivantes : sur la ligne de Bologne à San-Felice, la vitesse et la fréquence des trains ont été doublées, le nombre des voyageurs a quintuplé, et malgré une réduction de 40 p. 100 sur les tarifs, les recettes ont été doublées. D'autre part le rapport officiel sur la première année d'exploitation des lignes de la Valteline conclut comme suit :

« De tout ce qui précède, il résulte que le nouveau service de traction électrique a toujours été effectué d'une façon satisfaisante, non seulement au point de vue du trafic, mais aussi au point de vue technique. Les inconvénients qu'on a constatés sont peu nombreux, de peu d'importance et isolés. Chacun d'eux doit être attribué à des causes particulières et non à des causes organiques ou dues au système spécial de traction adopté.

« Le public, du reste, a démontré jusqu'à l'évidence le succès de l'expérience en accourant constamment aux trains électriques en si grand nombre que l'on a quelquefois craint, étant donnée l'insuffisance des automotrices, de ne pouvoir le transporter complètement. Durant une année d'exploitation, les trains électriques ont effectué environ 11 millions de kilomètres-voiture contre 4.769.000 effectués précédemment avec la traction à vapeur, et les recettes totales pour les voyageurs, malgré la réduction des tarifs, s'élevaient à 993 mille liras contre 663 mille liras pendant la même période de l'année précédente. »

permettront de l'appliquer également aux grands express, de manière à réaliser un notable accroissement de vitesse. Alors, fatalement, l'heure sonnera où la traction interurbaine sera transformée par l'électricité, et où les puissances hydrauliques seront appelées à devenir les auxiliaires de cette transformation.

* *

Ainsi, chacun des peuples co-propriétaires des Alpes s'attaque résolument, et dans une voie différente, à la mine d'énergie qu'elles recèlent. Mais, même si nous avons pu faire comprendre dans ses grandes lignes la transformation qui s'accomplit, nous ne nous tenons pas pour satisfaits.

La mise en exploitation des chutes d'eau soulève en effet un problème légal des plus importants, et qui nous intéresse tous, car il s'agit de savoir si nous devons laisser se former, aux dépens de la fortune publique, une nouvelle forme de propriété privée. Le législateur français ne paraît pas avoir soupçonné l'intérêt de ce problème ; pour lui, l'eau est uniquement l'auxiliaire des travaux agricoles et de l'hygiène urbaine ; il n'a pas vu en elle la puissance qui vivifie l'industrie moderne. Et c'est ainsi qu'au fatras des lois anciennes, il a superposé la loi du

8 avril 1898, sans que la question des chutes d'eau ait été abordée, encore moins résolue ; de tous temps, les questions d'eau et de riveraineté ont fourni ample matière aux chicanes et à l'arbitraire administratif ; elles n'ont pas, avec la législation nouvelle, perdu ce caractère. On en pourra juger par l'exposé très concis qui va suivre.

Les eaux sont réparties en trois grandes catégories. La première comprend les eaux pluviales, les sources et les étangs dont la propriété et l'usage sont réservés au propriétaire du fonds où elles apparaissent. La seconde catégorie contient les cours d'eau qui ne sont ni navigables ni flottables « à bûches perdues » ; bien que leur lit appartienne aux propriétaires des deux rives, la propriété de leurs eaux n'est pas déterminée ; Elle est « res nullius », comme on dit dans l'argot juridique. Enfin, les « fleuves et les rivières navigables ou flottables avec bateaux, trains ou radeaux » forment une troisième classe, celle des eaux domaniales, dont la propriété appartient à l'État.

A cette classification embrouillée vient se superposer une confusion nouvelle : les limites de ces trois classes sont indécises, si bien que lorsqu'il s'agit d'éclaircir un doute, le seul moyen pratique consiste à s'adresser à l'administration préfectorale, sans oublier que ses décisions peuvent être modifiées par le Conseil d'Etat.

De ces prémisses résulte que la situation légale

des puissances hydrauliques peut être bien différente suivant le cas : sont-elles créées à l'aide des eaux de la première catégorie ? Elles sont alors susceptibles d'un véritable droit de propriété. Si au contraire elles sont prises sur les cours d'eau de la seconde classe, elles peuvent alors être exploitées par les riverains, mais elles ne sont indépendantes, ni des autres riverains qui peuvent faire valoir des droits concurrents, ni de l'État qui a la police des eaux ; et alors il advient souvent que des agioteurs achètent sur un cours d'eau une riveraineté de quelques mètres, à l'aide de laquelle ils barrent la chute, soit pour éliminer une concurrence qu'ils redoutent, soit pour se faire acheter à grand prix le droit qu'ils ont acquis sur l'usage des eaux ; ainsi les créateurs d'usine ont d'abord à lutter contre les cupidités individuelles. Ils rencontrent ensuite sur leur route l'administration, de laquelle ils doivent obtenir, après enquête, une autorisation. Mais une fois ces difficultés aplanies, les chutes aménagées deviennent une véritable propriété, puisqu'il est admis que l'autorisation donnée ne peut plus être retirée que moyennant une juste indemnité.

Restent enfin les chutes produites par les eaux domaniales ; elles sont la propriété de l'État, qui peut en concéder l'exploitation moyennant une redevance annuelle. Cette concession ne constitue pas un titre de propriété et peut être (sauf quel-

ques exceptions sans intérêt pratique) retirée sans indemnité.

Voilà donc dans quel dédale juridique se débattent actuellement les industriels. En présence d'une pareille confusion, on comprend que des efforts aient été faits, soit par les intéressés, soit par les pouvoirs publics, pour amener une situation légale plus nette et plus équitable. Aussi, nombre de projets de loi attendent-ils, dans les dossiers de la Chambre des députés, une discussion que chaque jour rend plus nécessaire ; mais leur diversité même indique celle des intérêts en jeu.

C'est qu'en effet, en cette question comme en beaucoup d'autres, il y a conflit entre l'intérêt général et les intérêts particuliers. Ces derniers ont trouvé des défenseurs éloquents et convaincus au Congrès de la Houille blanche, qui s'est réuni en septembre 1902 à Grenoble, au cœur des exploitations des Alpes françaises. Les congressistes, après avoir admiré les résultats atteints par l'initiative individuelle, ont été appelés à constater la confusion de nos lois et les entraves qu'elles apportent à cette initiative. Ils ont parlé haut, comme ils en avaient le droit, et se réclamant des industries qu'ils ont créées, de la prospérité qu'ils apportent à nos Alpes, jadis si déshéritées, ils ont protesté à la fois contre l'agiotage des barreaux de chutes, et contre la tutelle inquiétante de l'État.

Mais d'autres intérêts ont droit aussi de parler, qui se sont tus jusqu'à présent ; ce sont ceux de l'État, c'est-à-dire de chacun de nous ; et c'est parce que la question est d'intérêt général que cette étude a été écrite, pour rappeler et faire comprendre à chacun le droit qu'il a de se former un opinion, et de la défendre.

S'il y a en effet une vérité qui s'impose, c'est celle-ci : *Les puissances hydrauliques du pays appartiennent à la communauté.* C'est elle que la société suisse « Frei land » affirmait en 1891, en proposant d'ajouter à la constitution fédérale l'article suivant : « Toutes les forces hydrauliques de la Suisse, non encore utilisées, sont propriété de la Confédération ; leur exploitation et leur transport appartiennent à la Confédération. Une loi spéciale réglera le monopole et la répartition des bénéfices qu'il pourra produire. »

C'est encore le même principe directeur qui a inspiré le projet de loi déposé par le gouvernement français, le 6 juillet 1900, et qui attend encore l'heure de la discussion publique. D'après ce projet, toutes les chutes ayant une puissance moyenne supérieure à cent chevaux, doivent être concédées par l'État, qui s'en déclare par là même propriétaire, et qui fixe sur le cahier des charges la durée de la concession, à l'expiration de laquelle la chute aménagée lui fait retour sans indemnité.

Ainsi se trouve nettement affirmée une thèse

sur laquelle il faudra bien qu'on se prononce, un jour ou l'autre, mais dont le rejet serait gros de conséquences. A la faveur de la législation actuelle, une bonne partie des puissances hydrauliques passe peu à peu sous le régime de la propriété particulière ; des droits se forment, qui ne pourront être supprimés qu'au prix de coûteuses expropriations. Et pourtant y a-t-il quelque chose de moins compatible avec l'idée qu'on se fait de la propriété individuelle, que cette eau des torrents, dont la source avoisine le ciel, et qu'un perpétuel mouvement envoie se perdre dans la mer ? L'ancien législateur avait considéré comme domaniales les seules eaux navigables, parce qu'il pensait que celles-là seules pourraient servir à la communauté, et que les autres n'avaient de valeur que pour des particuliers ; que peut-t-il subsister de cette distinction aujourd'hui que nous voyons tel torrent des Alpes, converti en courant électrique, aller distribuer la force et la lumière à plusieurs centaines de kilomètres, et vivifier de son énergie des régions étendues ? C'est ce qui nous donne le droit de déclarer que les chutes d'eau sont le bien de tous, parce qu'elles sont utiles à tous ; elles le sont au même titre que les mines de sous-sol, que l'air qui nous entoure et dont nul encore n'a songé, par bonheur, à accaparer les courants et la puissance.

D'ailleurs, M. Hanotaux n'indiquait-il pas

l'inanité de tous les raisonnements sur la propriété des chutes, lorsqu'il disait très finement, et sans doute avec quelque ironie, aux congressistes de la Houille blanche : « Quelle extension soudaine de la science juridique ! Il ne s'agit plus seulement de la propriété des objets sensibles, faciles à saisir, à déterminer dans leur forme ou leur résolution. Voici maintenant qu'il faut légiférer sur cette abstraction : la force ; il faut capter dans le rideau des lois l'eau qui coule, le fluide qui circule, le rayon qui se glisse, moins encore, l'instant, le mouvement, la pente ! »

C'est pourquoi, à toutes les subtilités de la casuistique juridique, nous préférons une affirmation nette de l'intérêt général.

Cette affirmation, qui aujourd'hui peut sembler brutale, eût passé inaperçue et n'eût soulevé aucune protestation si on avait su à temps la mettre dans notre code ; légale en Algérie, où tous les cours d'eau, sans distinction, sont du domaine public, elle le serait aussi bien en France. En tous cas, elle est devenue nécessaire, si nous voulons être prévoyants. Sans pouvoir préciser ce que l'avenir tient en réserve, nous sentons, nous savons même qu'avant un demi-siècle, les puissances hydrauliques seront appelées à jouer un rôle considérable. Elles contribueront sans doute pour une large part à l'éclairage public ; peut-être aussi des distributions de force à domicile serviront-elles à main-

tenir l'équilibre social en permettant aux ouvriers isolés de résister à la puissance d'absorption des usines. Enfin, qui peut prévoir le rôle que les chutes auront à jouer comme auxiliaires de la traction ferrée ? L'expérience qui se poursuit actuellement chez nos voisins nous fixera sur ce point ; mais il faut se rappeler qu'un jour à venir, nos chemins de fer auront fait retour à la communauté, et que si, à ce moment-là, l'État est possesseur d'usines hydro-électriques aménagées, il pourra se servir des secondes pour actionner les premières. Rien que dans le quadrilatère formé par le Rhône, les Alpes et la mer, il y a 3.500 kilomètres de chemins de fer qui exigent pour être desservis une puissance approximative de 200.000 chevaux ; il y aura sans doute un intérêt national à couvrir ce quadrilatère d'un vaste réseau de distribution d'énergie auquel les trains emprunteront leur puissance, les cités, leur lumière, les usines, leur force motrice. C'est un plan d'ensemble à combiner, dont nous pouvons bien imaginer les grandes lignes, mais dont le détail ne pourra être précisé que peu à peu ; en tout cas, nous avons le devoir d'en assurer la réalisation quand l'heure sera venue, sous peine d'être lourdement responsables devant nos successeurs, pour avoir mal géré le bien national, et laissé perdre une fortune qui ne se retrouvera plus.

Qu'on n'aille pas se figurer, d'ailleurs, qu'une semblable détermination puisse nuire à l'activité industrielle des Alpes, ni arrêter cet admirable élan d'initiative individuelle, dont nous avons le droit d'être fiers. Les concessions d'eau accordées aux industriels devront avoir une durée suffisante pour leur permettre de se rémunérer largement de leurs efforts ; elles les assureront contre toutes les tracasseries, qu'elles viennent des particuliers ou de l'État ; enfin tout devra être fait pour les encourager à multiplier leurs installations, et à aménager leurs chutes d'une façon rationnelle ; mais aussi, à l'expiration de leurs concessions, les services publics bénéficieront de cette inépuisable puissance des rivières de France, et pourront l'attribuer aux œuvres d'intérêt général, en louant l'excédent aux industries particulières.

Il y a bien des manières de prévoir ces contrats passés entre l'État, possesseur des chutes, et les particuliers ; notre but n'est pas d'entrer dans leur discussion détaillée, mais d'attirer l'attention sur une question d'où dépend, pour une grande part, notre avenir économique. Et puisque des intérêts opposés sont en présence, et qu'une prochaine solution s'impose, nous devons souhaiter que, soucieuse des intérêts particuliers, elle affirme cependant sans équivoque l'intérêt et le droit de la communauté.

Pour mieux fixer l'esprit du lecteur, nous

reproduisons en terminant les dispositifs essentiels du projet gouvernemental du 6 juillet 1900.

Article premier. — Les usines hydrauliques, quelles que soient les eaux qu'elles empruntent, se divisent en usines privées et usines publiques.

Les usines privées continuent à être régies par les lois et règlements en vigueur.

Les usines publiques sont régies par les dispositions ci-après :

Art. 2. — Les usines publiques sont concédées au nom de l'État dans l'intérêt de l'industrie et des services publics.

Lorsque le seul usage immédiatement prévu est le service d'un ou de plusieurs établissements industriels, les réserves nécessaires dans l'intérêt des services publics éventuels sont prévues dans le cahier des charges de la concession.

Sont nécessairement concédées comme usines publiques les usines qui seraient créées postérieurement à la présente loi et qui auraient une puissance brute, en eaux moyennes, d'au moins cent chevaux-vapeur.

Art. 3. — Les usines publiques sont déclarées d'utilité publique et concédées par décret rendu sur l'avis conforme du Conseil d'État.

Art. 4. — Le cahier des charges de la concession détermine : la durée de la concession ; les ouvrages, terrains, bâtiments, engins de toute nature qui constituent les dépendances immobilières de la concession ; le règlement d'eau de l'usine, etc.

Art. 5. — Le déclaration d'utilité publique a pour effet de classer dans le domaine public l'usine hydraulique et ses dépendances immobilières ; ces ouvrages sont assimilés aux ouvrages dépendant de la grande voirie.

Art. 12. — A l'expiration du terme fixé, la concession

avec toutes ses dépendances fait retour à l'État, sans aucune indemnité.

Dans les cinq ans qui précèdent l'expiration de la concession, il est procédé à l'institution d'une concession nouvelle. Le concessionnaire actuel a un droit de préférence, à conditions équivalentes ; si, deux ans avant l'expiration, aucune concession nouvelle n'a été instituée, il peut exiger la prorogation de sa concession pour une nouvelle durée de dix ans.

Art. 13. — L'État peut, à toute époque, après l'expiration des quinze premières années, racheter la concession.

L'ÉLECTRO-CIIMIE

L'électro-chimie : c'est le nom d'une science patiemment élaborée, dans la paix des laboratoires et depuis près d'un siècle, par des hommes qui s'appellent Davy, Faraday, Jacobi, Becquerel, Minet, Moissan ; c'est aussi le nom d'une industrie, vieille de vingt-cinq ans à peine, mais dont le développement est assez rapide pour qu'on doive tout attendre de son avenir. Ainsi, la question est double, à la fois scientifique et économique. Pour le savant, elle est attachante par tout le mystère qu'elle renferme encore, par les découvertes qu'elle promet comme par celles qu'on y a déjà faites. A l'économiste, elle offre le spectacle d'une industrie, née d'hier et dont les produits annuels dépassent 700 millions ¹.

1. En voici la liste approximative et incomplète :

Produits.	Poids fabriqués en tonnes.		Valeur en millions de francs.	
	Dans le monde.	En France.	Dans le monde.	En France.
Aluminium	12.000	6.000	34	17
Argent	1.500	25	150	2,5
<i>A reporter</i>			484	19,5

A coup sûr, si une aussi formidable poussée industrielle s'était manifestée dans les grandes villes, elle aurait attiré l'attention; mais elle s'est produite dans les recoins les plus ignorés des Alpes et des Pyrénées, et par suite est passée presque inaperçue. Il est vraisemblable qu'aux yeux du plus grand nombre, l'électrochimie apparaît comme une industrie secondaire, comparable à la fabrication des confetti ou des fleurs artificielles. C'était vrai il y a dix ans, mais les choses ont changé : en France seulement, l'électrochimie utilise une puissance voisine de 150.000 chevaux, égale à celle que Paris, cette grande ruche, emploie pour faire tourner toutes ses machines, et elle nous offre le spectacle consolant d'une industrie qui, pour vivre et prospérer, ne demande rien que la liberté, alors que tant d'autres n'arrivent à se

Produits.	Poids fabriqués en tonnes.		Valeurs en millions de francs.	
	Dans le monde.	En France.	Dans le monde.	En France.
<i>Report.</i>			184	19,5
Cuivre	190.000	8.000	325	15
Or	21	0,3	75	1
Sodium	260	»	1,5	»
Carborundum	1.600	800	2	1
Carbure de calcium	250.000	37.000	90	13
Céruse	2.500	?	1,4	?
Chlorate de potasse	11.000	6.400	9	5,2
Chlorure de chaux	225.000	110.000	25	12
Potasse caustique	17.000	»	8	»
Soude caustique	85.000	46.000	16	8,7
Totaux			<u>736,9</u>	<u>75,4</u>

soutenir qu'à l'aide des commandes de l'État, ou par sa protection.

Loin de faire appel aux pouvoirs publics, l'industrie électro-chimique cherche plutôt à s'en faire oublier, sachant bien qu'elle n'en obtiendrait que des impôts, comme en Italie, ou, ce qui serait pire, une législation tracassière et compliquée. Aussi est-elle discrète ; elle ne fait de réclame que juste ce qu'il en faut pour écouler ses produits, et évite cette publicité tapageuse qui est, paraît-il, indispensable à nombre d'industries modernes : à l'exposition de 1900, où les producteurs du monde entier cherchaient à se présenter avec tous leurs avantages, elle s'était faite tellement modeste, que sans la brillante collaboration de M. Moissan elle eût peut-être passé inaperçue ; reléguée au fond du Champ de Mars, n'offrant guère aux yeux du public que des graphiques ou des échantillons, elle semblait avoir mis à s'effacer autant de soin que d'autres en prennent pour paraître.

A ce point de vue, nos modernes électro-chimistes sont bien les successeurs des alchimistes du moyen âge ; comme eux, ils gardent soigneusement le secret de leurs procédés, et ne laissent pénétrer dans leurs laboratoires que de rares initiés ; quant aux brevets d'invention, ils sont rédigés avec un laconisme désespérant. Et sans doute, si, aujourd'hui comme au moyen âge, les mêmes procédés se reproduisent, c'est

que les causes sont les mêmes ; c'est de l'or que faisaient ou croyaient faire les alchimistes avec la poudre de projection, l'élixir des philosophes ou la pierre philosophale ; et c'est en or aussi que se transmue aujourd'hui, dans les usines électro-chimiques, l'énergie des torrents dévalés des glaciers alpestres.

Malgré cette obstination dans le silence, d'ailleurs parfaitement légitime, l'obscurité, peu à peu, se dissipe. Les principes des procédés employés appartiennent à la science, ils nous sont pleinement connus ; seuls quelques détails techniques, quelques tours de main, nous échappent, mais nous en savons assez pour comprendre et pour expliquer. Les données statistiques nous manquent encore, ou ne sont que grossièrement approchées ; chose naturelle dans une industrie en voie de développement rapide, et explicable encore par la réserve des industriels qui évitent de faire connaître la valeur de leur production, l'expérience leur ayant appris que la statistique est l'avant-courrière de la taxation. Néanmoins, pour les esprits moins curieux de chiffres précis que d'idées générales, il est possible, dès à présent, de se représenter l'état de l'industrie électro-chimique, et même de prévoir avec quelque vraisemblance les directions dans lesquelles elle est appelée à se développer.

*
* *

A la base de l'électro-chimie, comme de la plupart des industries modernes, se trouvent des notions scientifiques qu'il est indispensable d'exposer brièvement ; elles auront l'avantage de nous permettre, dès à présent, d'établir une classification entre tant d'applications différentes. En effet, ce qu'il importe de bien voir tout d'abord, c'est que les opérations de l'électro-chimie se rapportent à deux types bien distincts pour lesquels on a créé les noms, d'ailleurs peu engageants, d'*électro-thermie* et d'*électrolyse*.

L'électro-thermie, c'est tout simplement le chauffage à l'électricité : quand le courant traverse le filament de charbon d'une lampe à incandescence, ou quand il fraye sa route entre les deux crayons de l'arc électrique, il dégage assez de chaleur pour les porter au rouge blanc, et ainsi l'énergie du courant se retrouve tout entière sous forme de chaleur. La caractéristique de ce dégagement de chaleur, c'est qu'il peut être localisé exactement au point voulu, car il n'apparaît qu'aux endroits résistants du circuit, et d'autre part qu'il peut être accru à volonté, puisqu'il croît avec l'intensité du courant employé. Attelez, comme l'a fait M. Moissan, un moteur de 400 chevaux à une dynamo de même puissance, et em-

ployez le courant produit à entretenir un arc électrique. Toute l'énergie de cette puissante machine va se dépenser dans l'espace qui sépare les deux crayons de l'arc, à peu près comme si vous aviez brûlé, dans ces quelques centimètres cubes, toute la houille qu'a dévorée le foyer ; renfermez maintenant l'arc dans un bloc de chaux vive, évidé en son centre ; cette chaleur, au lieu de rayonner dans l'espace, se concentre dans une cavité inférieure à un litre, où la température atteint environ 3.000 degrés : vous avez alors le four électrique, qui n'est, en somme, qu'un laboratoire à haute température. Mais, tandis que les procédés utilisés jusqu'ici par les chimistes et les métallurgistes avaient à peine permis d'atteindre 2.000 degrés, nous pouvons maintenant obtenir une température bien supérieure, où les conditions d'équilibre chimique sont profondément modifiées. Toute une chimie nouvelle s'offre à nous ; prise dans son ensemble, c'est la chimie des corps réfractaires, du carbone, des oxydes terreux, des métaux difficilement fusibles, corps dont les énergies chimiques semblent sommeiller aux températures plus basses, pour ne se réveiller qu'à l'ardeur de cette fournaise. Mais ce qu'il importe de constater, c'est que, dans ce four, l'électricité n'a agi que sous forme de chaleur, et comme un moyen commode de maintenir des températures élevées ; et la preuve, c'est qu'on utilise indif-

féremment dans le four le courant continu ou le courant alternatif, c'est encore que les produits du four électrique ont pu, depuis quelques années, être réalisés par d'autres moyens, où l'électricité ne joue aucun rôle, et que nous aurons bientôt l'occasion de signaler.

Tout autre est le rôle de l'électricité dans l'électrolyse. Ici elle intervient par elle-même ; c'est elle qui, par un mécanisme encore incomplètement connu, brise les chaînes qui unissent les atomes dans les molécules, et provoque, au sein des liquides qu'elle traverse, cent produits nouveaux dont la nature et les proportions ne dépendent pas seulement de la composition de ces liquides, mais de leur température, de la nature du courant qui les traverse, et d'autres causes encore ; si bien qu'à côté des lois fondamentales et très simples de l'électrolyse, telles que les a indiquées Faraday, nous trouvons le chaos des cas particuliers, tellement nombreux, tellement complexes, que c'est à l'expérience seule qu'il appartient, jusqu'ici, de les étudier. Circonstance fâcheuse, peut-être, pour ceux qui aiment à trouver une belle ordonnance de faits découlant logiquement de lois simples, mais heureuse, en somme, puisque la complexité des faits manifeste la fécondité de la méthode électrolytique, son aptitude à reproduire les corps connus, simples ou composés, et à en fournir de nouveaux.

Aujourd'hui, dans les universités et ailleurs, des laboratoires sont uniquement consacrés à l'étude systématique des réactions électrolytiques ; c'est là, sans nul doute, que s'élabore, en grande partie, la chimie de l'avenir. Mais pour prendre une idée générale de l'électro-chimie électrolytique, il suffit de s'en tenir aux règles posées par Faraday : que l'électrolyse n'opère que sur les sels fondus ou dissous ; qu'elle exige un courant toujours de même sens, amené par deux conducteurs, ou électrodes, plongés dans le liquide, l'électrode positive pour l'entrée du courant, la négative pour la sortie ; que les produits libérés par l'électrolyse apparaissent exclusivement sur les électrodes et dans leur voisinage immédiat ; enfin, que le poids de ces produits est proportionnel à la quantité d'électricité qui a traversé le bain, ou dans un temps donné, à l'intensité du courant. C'est avec ce mince bagage de souvenirs que nous allons entreprendre, non une étude systématique des opérations électrolytiques, car celles-là seules qui ont pris pied dans l'industrie nous entraîneraient plus loin qu'il ne convient, mais un examen sommaire de quelques-unes de ces opérations, choisies comme types, en raison de leur importance industrielle.



De toutes ces industries, la plus ancienne, actuellement encore une des plus prospères, c'est la fabrication électrolytique du cuivre pur. Sur les 500.000 tonnes de cuivre qui sortent actuellement des usines métallurgiques, la moitié environ a passé par les usines de raffinage électrique dont les produits peuvent s'évaluer, de ce chef, à près de quatre cents millions de francs : nous sommes loin des temps où la galvanoplastie se renfermait dans la reproduction des médailles ou des statuettes. De cette transformation, l'électricité a été à la fois la cause et l'effet : l'effet, parce que seuls les progrès de l'électrotechnique permettaient d'obtenir à bon compte les courants intenses et réguliers que nécessite le raffinage électrique ; la cause, parce que c'est l'électricité qui a créé le besoin du cuivre pur. Jadis, le cuivre brut, résultat du traitement des minerais par grillages et réductions successives, suffisait aux besoins industriels ; c'était un métal impur, fortement mélangé d'oxydes, d'arsenic, de plomb, de zinc, de fer, même d'or et d'argent. Or, ce cuivre brut, en dehors même de ses qualités plastiques inférieures à celles du métal pur, présentait une conductibilité électrique très variable, toujours plus faible que celle du cuivre

électrolytique. Les électriciens ne tardèrent pas à exiger, pour leurs différents types de conducteurs, un métal exactement purifié, employé tel quel ou allié en proportions définies à d'autres métaux. Les mines de cuivre natif du lac Supérieur fournissent, il est vrai, un métal pur et applicable directement aux emplois électriques, mais elles ne peuvent suffire à la demande. Aussi, il y a une vingtaine d'années, un grand nombre d'usines de raffinage électrolytique se créèrent en Allemagne, en France, en Angleterre. D'abord très prospères, elles subirent bientôt la concurrence d'usines similaires organisées aux États-Unis. Celles-ci, plus rapprochées des centres de production du cuivre brut, organisées en grand et avec cette admirable entente des questions industrielles qui caractérise l'esprit américain, ont depuis imposé leurs produits au monde entier, et, actuellement, le raffinage du cuivre est, dans l'ensemble, un monopole des États-Unis.

Voyons donc comment opèrent les usines américaines, par exemple cette gigantesque *Anaconda Mining Co.*, qui produit journellement 150 tonnes de cuivre pur. Trois immenses halls placés côte à côte renferment les bacs à électrolyse, sortes d'auges en bois doublées intérieurement de plomb; dans chacune plongent, au sein du sulfate de cuivre, deux électrodes : l'une, la positive, est en cuivre brut;

l'autre, la négative, est une mince lame de cuivre pur ; le courant passe et dépose sur celle-ci du cuivre pur, un des produits de l'électrolyse, tandis que l'autre, l'acide sulfurique, attaque l'électrode positive et reforme dans le bain autant de sulfate qu'il en avait été détruit par l'électrolyse. Peu à peu l'électrode négative engraisse, l'électrode positive maigrit, et les impuretés qu'elle contenait viennent dans le bain, dont elles virent la couleur du bleu au vert sale, puis s'oxydent au contact de l'air et tombent au fond des bacs sous formes de boues grisâtres. Les électrodes en cuivre pur, amenées à l'épaisseur voulue, sont retirées du bain, fondues et remplacées par de nouvelles lames ; ainsi l'usine ne chôme ni le jour ni la nuit. En même temps, un jeu de pompes assure la circulation du sulfate d'un bac au suivant, et tout le liquide passe ainsi dans d'immenses citernes de décantation, où il abandonne ces précieuses boues riches de tout l'or et de tout l'argent contenus dans le cuivre brut : à elle seule, la valeur des boues couvre les frais du raffinage, si bien que le cuivre pur peut être livré presque au même prix que le cuivre brut¹.

Grâce à l'admirable organisation des usines américaines, il n'y a plus place, en Europe, pour

1. Le raffinage du cuivre donne annuellement, comme sous-produits, 620.000 kilogrammes d'argent et 3.100 kilogrammes d'or.

des opérations analogues ; seules, quelques petites usines ont pu s'y maintenir à la faveur de circonstances particulières, comme, dans la région lyonnaise, l'utilisation des déchets de tréfilerie et d'orpaillage. Mais l'ancien continent peut encore lutter, à condition de produire le cuivre non plus à l'état brut, mais ouvré, et de revenir ainsi aux traditions et aux procédés de la galvanoplastie. C'est ce que réalise avec succès, bien que loin des centres producteurs et forces motrices économiques, une des plus belles usines électro-chimiques du monde : je veux parler des établissements de Dives (Calvados) qui occupent actuellement plus de mille ouvriers et produisent chaque année 8.000 tonnes de métal, cuivre pur, cupro-manganèse et laiton, sous forme de tubes obtenus directement par galvanoplastie, de lames et de fils.

*
* *

Le cas, actuellement unique en Europe, des usines de Dives, marque clairement quelles sont, pour le producteur européen, les conditions avantageuses de l'électro-métallurgie du cuivre. Cet exemple mérite d'être suivi¹ ; la consommation des cuivres ouvrés est assez considérable

1. Deux usines analogues sont en construction, l'une en Russie, l'autre en Angleterre.

dans le monde pour qu'il reste, de ce chef, une large place aux opérations industrielles. Mais un entraînement, peut-être irréfléchi, semblable à la fièvre de l'or qui prend les hommes après la découverte de certains placers, a poussé nos électro-chimistes français bien loin de ces trop vieilles applications, et orienté toutes les intelligences, tous les capitaux, vers de nouvelles et retentissantes découvertes de l'électro-chimie.

De ce côté, il est vrai, tout avait le charme des idées neuves et l'attrait de l'imprévu; on était suspendu entre la fortune et la faillite, et les imaginatifs, oublieux des mécomptes, se redisaient les résultats admirables obtenus dans certaines usines : telles les légendes qui, aux mines d'or, se créent autour de claims privilégiés. En tout cas, celui qui étudie ces questions en dehors de toute préoccupation financière doit constater que l'usine électro-chimique moderne a pour elle une véritable originalité; jusqu'en ses détails, elle se différencie du raffinage du cuivre, cette douairière de l'électro-chimie, une douairière vieille de vingt-cinq ans ! Tout comme les usines de Dives, les usines américaines de cuivre empruntent au charbon leur force motrice. L'électro-chimie moderne dédaigne ces antiques procédés; elle est toute aux procédés hydro-électriques. C'est aux torrents des Alpes et des Pyrénées qu'on demande aujourd'hui l'énergie

nécessaire. Il y a quinze ans encore, ils bondissaient, gais et libres, de roc en roc ; aujourd'hui, combien d'entre eux, enfermés dans un corset d'acier, s'en vont tourner la meule au fond des usines ! Ainsi, formant des chutes artificielles dont la hauteur atteint parfois 600 mètres, ils dévalent du haut de leurs montagnes, à une vitesse de projectile, jusqu'aux ailes de bronze des turbines qu'ils entraînent et dont la rotation commande celle des générateurs électriques, dynamos à courant continu pour l'électrolyse, alternateurs pour les fours électriques.

Le rêve des électro-chimistes, comme de tous les industriels, est de transformer un produit abondant et peu coûteux en un autre d'un prix élevé et d'une grande consommation ; à ce point de vue, l'électrolyse du chlorure de sodium ou sel marin, et de son sosie le chlorure de potassium, constitue l'opération idéale. Comme matière première, un des corps les plus abondants de la nature, et, comme produit, toute une série de corps appartenant à la grande industrie chimique et dont les débouchés sont, pour ainsi dire, illimités : le chlore et les hypochlorites, aux innombrables emplois décolorants et désinfectants ; la potasse et la soude, utilisées pour la verrerie, la cristallerie, la fabrication des savons ; l'acide chlorhydrique ; les chlorates et perchlorates, utilisés en médecine et pour la préparation des explosifs. Aussi, nulle opération électroly-

tique n'a-t-elle, plus que celle-là, excité l'ingéniosité des chercheurs, nulle aussi n'a connu de plus éclatants succès, de plus affligeantes déconvenues ; elle cache, en effet, sous l'apparence d'une facilité tentatrice, des difficultés de premier ordre. La première est l'abondance même des produits qu'elle offre, pêle-mêle, à l'opérateur ; pour obtenir chacun d'eux séparément, et avec son rendement maximum, il a fallu des années d'efforts laborieux. Il a fallu secondement triompher d'un autre ennemi, le chlore, terrible rongeur d'électrodes, et ç'a été pour les inventeurs la tâche la plus ingrate, celle où nulle vue théorique ne guide les essais, où la réussite ne dépend presque que du hasard ; souvent encore, il a fallu parquer ce produit encombrant dans un coin de l'auge électrolytique, pour préserver de son action le reste du liquide, et on y est parvenu à l'aide de cloisons poreuses, mais combien difficiles à réaliser pour être en état de résister à ce corps qui se combine à tant d'autres, et qui désagrège ceux auxquels il ne peut se combiner !

Malgré ces difficultés rebutantes, l'électrolyse des chlorures occupe aujourd'hui de nombreuses usines et doit être considérée comme une des branches de l'électro-chimie dont l'avenir est le plus grand, à cause de ses débouchés presque illimités. C'est ainsi qu'en Allemagne le chlorure de potassium des inépuisables gisements de

Stassfurt est traité électrolytiquement pour fabriquer la potasse ; la fabrication de la soude électrolytique s'est concentrée dans les Alpes françaises, à proximité des savonneries de Marseille, des verreries de Lyon et de la Loire ; la préparation électrique du chlorure de chaux, corollaire des précédentes, suffit amplement, dès aujourd'hui, aux besoins de l'industrie ; les hypochlorites décolorants, et spécialement celui de soude, sont devenus les auxiliaires des industries du papier, par leur emploi au blanchiment de la pâte ; enfin, la préparation du chlorate et du perchlorate de potasse, utilisant les méthodes découvertes par MM. Gall et de Montlaur, est devenue, dans les Alpes françaises, le Jura suisse et la Suède, une des plus fructueuses parmi les industries électro-chimiques. Elle a même eu cette heureuse fortune de supprimer l'ancienne préparation par voie chimique, il y a peu d'années encore monopolisée par l'Angleterre : puis, désireuse d'étendre ses débouchés, elle a cherché et trouvé des emplois nouveaux dans la fabrication des explosifs : on prépare actuellement, à l'usine de Chedde, près Chamonix, un produit nommé *cheddite* et qui n'est autre chose qu'un composé nitré, généralement de la nitronaphtaline en solution dans l'huile de ricin, et auquel est incorporé du chlorate de potasse pulvérisé. Ce corps, dont le monopole de l'État français en matière d'explo-

sifs n'a pas permis l'emploi chez nous, s'exporte actuellement à l'étranger en quantités considérables, principalement en Allemagne et en Russie.

Ainsi, dans toute cette branche des opérations industrielles, nous assistons à une lutte prodigieusement active entre les anciens procédés chimiques, aux assises centenaires, et les méthodes nouvelles. Les premiers, avec les capitaux puissants dont ils disposent, avec toutes les industries dont ils sont solidaires, sont capables d'une longue résistance ; pourtant on les voit faiblir, et il est présumable qu'un jour le marché de la potasse, de la soude et des chlorures décolorants finira par leur échapper, comme le cas s'est déjà réalisé pour le marché plus restreint des chlorates. Déjà, en 1899, cette évolution avait été nettement aperçue par une des sommités scientifiques de la Suisse, le professeur Lunge : « Autant que nous puissions le voir par la marche générale des recherches entreprises, la prochaine génération tirera tout son chlore de l'électrolyse », disait-il dans une conférence faite à Liverpool, et il est vraisemblable que cette prédiction ne péchait que par excès de prudence.

*
*
*

Mais, en même temps qu'elle s'étendait sur le

domaine de la grande industrie chimique, l'électricité conquérait à l'humanité de nouveaux produits, ou du moins faisait passer leur préparation du laboratoire à l'usine. Tel est le cas de l'aluminium, ce métal léger comme le verre, inaltérable comme l'argent, ce métal dont le minerai est peut-être le plus répandu sur la terre, puisque l'argile de notre sol en est faite, et que pourtant l'humanité semble avoir ignoré jusqu'en ces dernières années. Ici, toutefois, la légende a précédé l'histoire : à l'en croire, un pauvre artisan romain aurait jadis tiré du verre un métal, léger comme lui, avec lequel il fit une coupe qu'il offrit à l'empereur Tibère. César accepta ce don, loua l'ouvrier, puis, pris d'une inquiétude soudaine, lui demanda s'il avait révélé son secret. « Il n'est connu que de moi seul et de Jupiter », répondit l'homme. Tibère alors, craignant que la valeur de l'or et de l'argent ne vint subitement à être dépréciée par un métal aussi répandu que l'aluminium, donna ordre de détruire l'atelier du malheureux artisan, et à lui-même il fit trancher la tête, *eum decollari jussit imperator*.

De fait, il est possible, à la rigueur, qu'en chauffant dans ses creusets un mélange d'argile, de charbon et de borax, quelque artisan y ait pu trouver des parcelles d'aluminium ; mais, il faut le déclarer hautement, l'homme qui a vraiment trouvé l'aluminium, celui qui nous a révélé

toutes ses propriétés, ses procédés de fabrication, ses principales applications, c'est Henri Sainte-Claire Deville, le savant illustre qui, suivant l'expression de Pasteur, a tenu durant trente années, jusqu'à sa mort, en 1881, le sceptre de la chimie minérale. Par malheur, au moment de ses études sur l'aluminium, vers 1855, les piles étaient le seul électrogène connu, et il fallut se contenter des procédés purement chimiques qui, passant par l'intermédiaire du sodium, mettaient l'aluminium, par son prix de revient, à côté des métaux précieux auxquels semblait se rattacher son inaltérabilité. En 1886 encore, l'industrie chimique de l'aluminium était localisée à Salindres, dans le Gard ; elle occupait trois ouvriers et le métal valait 80 francs le kilogramme. Mais, depuis, les progrès de l'hydraulique et de l'électricité ont permis d'obtenir à bas prix l'énergie électrique, et les méthodes électrolytiques indiquées par Deville ont pu recevoir leur application. De ce fait, l'aluminium est descendu au palier des métaux communs, à côté du cuivre ; sa production annuelle dépasse 12.000 tonnes, et occupe 4,000 ouvriers, et son prix de revient, voisin de 2 fr. 50 le kilogramme, est peut-être destiné à s'abaisser encore ; mais il ne faut pas se dissimuler que le problème ainsi posé n'est pas du ressort de l'électricité, car le prix du métal est commandé par celui de son oxyde, l'alumine, obtenue actuellement aux

dépens de la bauxite par des opérations assez longues et coûteuses¹.

Actuellement, la production mondiale de l'aluminium est localisée dans un petit nombre d'usines²; les procédés employés sont par suite peu nombreux; on peut même, en négligeant de légères divergences, qui n'ont sans doute pour but que de justifier les brevets, les ramener à un seul: l'électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolithe, composé naturel de sodium et d'aluminium dont le Groenland et l'Oural renferment d'importants gisements. L'opération se fait dans les fours en aggloméré de coke, tantôt profonds et cylindriques, tantôt évasés en forme de cuvette, par où ressort le courant amené par une électrode également en aggloméré; mais ce qui caractérise ces fours électriques, c'est qu'ils sont chauffés non du dehors, mais en dedans, par le courant même qui les traverse et qui les maintient à une température voisine de 850 degrés. A cette température, la cryolithe est liquide et dissout l'alumine; celle-ci s'électro-

1. Dépenses approximatives nécessaires pour la production d'un kilogramme d'aluminium :

	fr.
Alumine	1 50
Cryolithe.	» 06
Electrodes en charbon	» 50
Force motrice	» 44
Total.	<u>2 50</u>

2. Dont deux en France, à la Praz et à Saint-Michel de Maurienne (Savoie).

lyse, donne de l'aluminium qui tombe liquide au fond du bain, tandis que son autre constituant, l'oxygène, s'unit au charbon de l'électrode mobile pour donner l'oxyde de carbone, dont la flamme bleuâtre voltige au-dessus du bain fondu : de temps en temps, on ajoute de l'alumine pour remplacer celle qui s'est décomposée, et, toutes les vingt-quatre heures, on procède à la coulée du métal formé dans les fours.

Telle est, réduite à son squelette, l'opération électro-chimique. Perfectionnée peu à peu dans ses détails, elle livre actuellement un métal remarquablement pur, à 99 et même 99,5 p. 100 d'aluminium : condition essentielle pour nombre d'emplois, car, si le métal pur résiste bien aux agents ordinaires, air, eau, acides, en revanche l'aluminium souillé d'impuretés est promptement rongé, surtout par l'eau de mer, et transformé en une masse spongieuse qu'une épingle traverse aisément. Actuellement déjà, et bien que la période des discussions et des essais ne soit pas close encore, l'aluminium pur a reçu de nombreux emplois pour lesquels sa légèreté et son inaltérabilité le rendent sans rivaux : il suffira de rappeler sa récente introduction dans l'armée, en remplacement des ustensiles de campement en fer-blanc. Pour les canalisations électriques, l'aluminium se pose aussi en rival du cuivre, auquel il est substitué dans nombre d'installations modernes. Mais c'est plutôt

comme associé du cuivre que comme son rival, qu'il a trouvé ses plus nombreux emplois : formant avec lui une série de bronzes inaltérables, légers, élastiques, tenaces, il trouve ainsi dans les arts et l'industrie, cent applications diverses.

Chose curieuse, ce métal, dont la propriété la plus précieuse nous a paru être l'inaltérabilité, doit la plus importante de ses applications à une propriété inverse de celle-là. Expliquons-nous : l'apparente froideur de l'aluminium vis-à-vis des agents atmosphériques, de l'oxygène en particulier, n'est qu'un masque trompeur dû sans doute à une mince couche d'oxyde qui protège sa surface à la manière d'un vernis ; qu'on chauffe le métal, le masque tombe, ou s'écaille, et l'aluminium se révèle à nous avec son vrai caractère : il se combine alors à l'oxygène avec autant de violence que son voisin, le magnésium, et peut brûler, comme lui, avec un incomparable éclat. Il est même capable, le cas échéant, de dérober leur oxygène à ses voisins ; des mélanges d'oxydes métalliques et d'aluminium en poudre réagissent, quand on les enflamme en un point, avec une extrême énergie, et on raconte même que c'est de semblables compositions qu'étaient remplis les obus avec lesquels les Américains incendièrent, en vue de Cuba, la flotte espagnole. Mais ces propriétés réductrices de l'aluminium ont reçu d'autres applications, d'une utilité

moins discutable, dans les usines métallurgiques : avant la coulée, on jette dans la poche pleine d'acier fondu une faible quantité d'aluminium, environ 200 grammes par tonne; le métal se répand dans la masse fondue, y traque les oxydes, les réduit, et donne par suite à l'acier une netteté et une homogénéité qui accroissent grandement sa résistance à la rupture.

Ainsi, en fabriquant l'aluminium, c'est véritablement d'un combustible nouveau qu'on a doté l'industrie, et la chose est devenue plus visible encore depuis qu'un industriel d'Essen, M. Goldschmidt, a créé sur ces données une nouvelle métallurgie, applicable surtout aux métaux réfractaires, et qu'on nomme aujourd'hui l'alumino-thermie. Veut-on, par exemple, obtenir du chrome métallique? Au lieu de réduire, suivant les vieilles règles de la métallurgie, l'oxyde par du charbon, on le réduira par l'aluminium : un mélange d'oxyde de chrome et d'aluminium en poudre est introduit dans un creuset; on l'enflamme avec une cartouche spéciale et un fil de magnésium; aussitôt la réaction s'amorce, l'aluminium s'empare de l'oxygène, la chaleur dégagée est telle que la température est comparable à celles qu'on a réalisées dans le four électrique: puis la réaction s'arrête, et au fond du creuset, sous une couche à demi cristallisée d'alumine, on trouve un culot massif de chrome. Et c'est

ainsi qu'actuellement, aux forges d'Essen, on prépare par centaines de kilogrammes le manganèse et le chrome utilisés pour la fabrication d'aciers spéciaux, avec lesquels se font obus et plaques de blindage.

*
**

Après avoir marqué nettement, comme nous avons essayé de le faire au début de cet article, la différence théorique qui sépare l'électrolyse de l'électro-thermie, nous devons nous attendre à ce que des opérations aussi distinctes exigent des dispositifs, des appareils entièrement différents. Dans la pratique, il n'en est rien, et on voit couramment des usines électro-chimiques préparer indifféremment et dans les mêmes fours, suivant la demande et le prix de vente, l'aluminium ou le carbure de calcium. C'est ce qui s'est produit surtout il y a quelques années, alors que l'industrie du carbure, encore à ses débuts, permettait d'entrevoir et parfois de réaliser de grands bénéfices. A ce moment, les droits résultant des brevets n'étaient pas clairement délimités, de telle sorte que toutes les usines électro-chimiques s'étaient jetées sur ce nouveau produit ; en même temps, des usines en nombre considérable s'édifiaient en vue de sa fabrication ; ce fut vraiment la folie du carbure, et en 1899, rien qu'en France, la moitié des

ances utilisées pour l'électro-chimie, soit 60.000 chevaux, travaillait pour cette seule industrie.

Ces beaux jours ont eu des lendemains moins heureux ; à un certain moment, on a pu même craindre un krach formidable qui, il faut l'espérer, sera évité par le développement progressif de l'éclairage à l'acétylène : au reste, le temps a fait son œuvre, et cette industrie est entrée dans une phase normale, où il est possible de l'étudier et de démêler quelques-uns des problèmes qu'elle pose. Problème historique d'abord, et l'existence même d'un tel problème semble un défi à la raison humaine. Voilà une découverte, capitale pour l'humanité, qui a été faite, il y a quelques années à peine, pour ainsi dire sous nos yeux, et il nous est presque impossible de nommer son auteur ! Les Américains désignent leur compatriote Wilson, les Allemands, Borchers, les Français, MM. Moissan et Bullier. Ils prennent des brevets, et, dans chaque pays, les tribunaux trouvent des raisons valables pour accepter seulement ceux de leurs compatriotes. En France, après plusieurs années de procès, la vérité légale est la suivante : l'invention du carbure de calcium appartient à M. Moissan et à son collaborateur M. Bullier.

Par bonheur, la vérité scientifique paraît moins difficile à établir. Presque tout ce que nous savons de précis sur le carbure, est dû à M. Moissan et à ses collaborateurs, et n'est

d'ailleurs qu'un chapitre dans une mémorable série de travaux scientifiques, commencés, dès 1891, par les études sur le carbone et le diamant. D'autres, à coup sûr, ont obtenu ce carbure, qui se forme spontanément dans les fours électriques faits d'un bloc de chaux vive. Mais c'est M. Moissan qui nous a appris comment, aux températures élevées produites dans ce four, la chaux et le charbon peuvent réagir avec élimination de gaz oxyde de carbone pour donner un produit chimique contenant, uni au carbone, le métal dont la chaux est l'oxyde, c'est-à-dire le calcium ; ce produit, liquide à haute température, est à froid un solide compact, grisâtre, et dont la propriété caractéristique est de décomposer l'eau, sitôt mis en contact avec elle, en donnant, avec un résidu de chaux, un gaz, l'acétylène, à peine connu autrefois, mais qu'on a pu appeler du carbone gazeux, car il contient 92 p. 100 de son poids de carbone, uni à 8 d'hydrogène. Ce gaz, en brûlant dans l'air dans des conditions convenables, y produit la flamme, d'une blancheur et d'un éclat incomparables, que chacun connaît aujourd'hui.

Autour de ces découvertes fondamentales viennent se grouper une multitude de travaux se rapportant, les uns à l'utilisation du carbure, les autres à sa production. Il a fallu créer tout un outillage pour l'éclairage à l'acétylène, et

c'est à cette période d'essais que se rapportent quelques accidents dus à l'emploi de ce gaz ; ces accidents ont pu un moment ralentir l'essor de l'éclairage à l'acétylène, mais la preuve est faite aujourd'hui que le nouveau gaz est tout aussi maniable que le gaz d'éclairage, et à peine plus dangereux.

En même temps, les conditions économiques les plus favorables à la production du carbure étaient minutieusement étudiées. On reconnaissait que les températures primitivement employées étaient trop élevées pour un bon rendement, on modifiait la forme des fours et les constantes du courant électrique ; et les résultats obtenus étaient tels que la production en carbure par jour et par cheval passait de 2^{ks},4 à 4^{ks},6. Aujourd'hui que les secrets de fabrication ont été percés à jour, que les brevets ont reçu une sanction juridique, et que chacun a pu voir fabriquer du carbure de calcium à l'Exposition universelle, il est possible de visiter les usines à carbure. Prenons-en une comme type, celle de Notre-Dame-de-Briançon, où sont exploités les brevets Bullier.

L'usine, située sur les bords de l'Isère, dans un des plus beaux sites de la Savoie, emprunte son énergie à deux torrents : l'un, l'Eau Rousse, voisin de l'usine, fournit 3.500 chevaux, l'autre, le torrent de Belleville, à 12 kilomètres de là, engendre 6.500 autres chevaux de puissance

qui, convertis en courant électrique à haute tension, sont transportés sur des fils de cuivre jusqu'à Notre-Dame de Briançon. Puis toute cette énergie électrique, ramenée par des transformateurs à l'état de courant à grande intensité et de faible tension, pénètre dans la salle des fours. Ils sont là une vingtaine, placés côte à côte, construits extérieurement en briques réfractaires, intérieurement en agglomérés de coke; une électrode en charbon, grosse comme le corps d'un homme, plonge dans chacun d'eux; par l'ouverture supérieure du four, on introduit le mélange, préparé à l'avance, de chaux vive et de coke, concassés en menus morceaux; un ouvrier maintient la fixité du courant à travers la masse en agissant sur l'électrode mobile; une flamme bleuâtre, celle de l'oxyde de carbone qui se dégage, voltige à l'orifice du four. Toutes les deux heures, on débouche avec un ringard en fer le trou de coulée placé à la partie inférieure; alors un jet éblouissant de carbure fondu s'écoule dans la lingotière. Bientôt solidifié, il est concassé et scellé hermétiquement dans des bidons en fer; ainsi placé à l'abri de l'humidité, qui le décomposerait, il est prêt pour l'expédition. Chaque jour, vingt tonnes de carbure sortent de l'usine, représentant, au cours moyen de 400 francs, une somme voisine de 8.000 francs.

Ce carbure, c'est en somme de l'énergie qui

voyage, l'énergie des chutes d'eau qui ont servi à sa préparation. Un kilogramme de carbure représente, par sa combinaison avec l'eau et la combustion de l'acétylène produite, environ 5.000 calories, soit un peu moins qu'un kilogramme de houille; cette énergie, ainsi concentrée sur un petit volume, n'a guère servi jusqu'ici qu'à faire de la lumière, mais qui peut prévoir le rôle qui l'attend? Il faut, à coup sûr, se garer des utopies et ne pas trop compter sur le carbure comme producteur de force motrice, mais c'est plutôt sous forme de réactions chimiques que son énergie pourra être utilisée. Déjà, on l'a employée pour la métallurgie; en outre, il peut servir de point de départ pour l'élaboration d'un grand nombre de produits organiques: M. Berthelot n'a-t-il pas indiqué jadis une méthode pour transformer en alcool son principal dérivé, l'acétylène? Mais, en laissant de côté des applications encore problématiques¹, il reste, pour le moment, comme assise de la nouvelle industrie, l'éclairage à l'acétylène, dont l'avenir est assuré:

1. La préparation de l'alcool à l'aide du carbure de calcium ne souffre aucune difficulté, mais son prix de revient, estimé d'après celui du carbure, paraît beaucoup trop élevé. Peut-être, cependant, une solution économique est-elle possible en substituant au carbure de calcium les carbures de magnésium ou de baryum; les sous-produits de la préparation de l'alcool, magnésie et baryte, ayant une valeur commerciale assez élevée, rendraient peut-être l'opération rémunératrice.

l'acétylène possède, en effet, sur l'éclairage électrique et sur le gaz, l'avantage d'être portatif et applicable à de petites installations, et sur le pétrole, son plus sérieux rival, celui de fournir une lumière incomparable.

*
* * *

Le carbure de calcium est un type : sur le même patron sont taillés bien d'autres carbures, siliciures, phosphures, produits inconnus il y a dix ans, que le four électrique nous a révélés, et dont la liste s'allonge chaque jour. Rien de plus attrayant pour le chimiste que de voir apparaître aux températures élevées, ces affinités nouvelles, que rien ne permettait de présumer et qui organisent la matière en de nouveaux équilibres ; mais il est assez vraisemblable que les chercheurs auront bientôt épuisé le sujet, à voir l'ardeur avec laquelle ils s'y attaquent. En effet, il semble probable que le nombre des composés stables à ces très hautes températures est assez limité ; déjà les chimistes en sont réduits à l'étude des corps les plus rares, et il faut bien avouer que, s'ils y découvrent d'intéressants sujets de thèse, on n'en doit plus guère attendre de produits d'application courante. Aussi, tout en sachant quelle réserve est nécessaire quand il s'agit de pronostics industriels, on peut présumer que le rôle scientifique du four électrique se

limitera à un petit nombre d'opérations industrielles, dont la fabrication du carbure de calcium restera peut-être la seule importante.

Il est sage, toutefois, de ne pas se montrer trop affirmatif dans de semblables prédictions, car certains électro-chimistes n'ont pas craint de s'attaquer à la plus importante des industries modernes, celle de la fonte, du fer et de l'acier, et ils prétendent que le four électrique est destiné à remplacer le haut fourneau et le four d'affinage. L'étude de cette question a été poussée d'autant plus vivement que nombre d'usines, dépossédées de la fabrication du carbure par la reconnaissance des brevets Bullier, ont dû chercher, dans de nouvelles industries, l'emploi de leur force motrice ; au rebours de ce qui arrive dans la nature organisée, l'organe a créé la fonction, et les usines en rupture de carbure ont cherché un emploi dans la fabrication d'aciers spéciaux, ferro-siliciums, aciers au chrome et au tungstène, dont les emplois se sont singulièrement accrus dans ces dernières années. D'autres établissements, comme celui de Kerrousse (Morbihan), dans lequel on fabrique au four électrique une tonne d'acier par jour, doivent être considérés encore, moins comme des usines véritables que comme de grands laboratoires où l'électro-métallurgie du fer est étudiée méthodiquement ; et il n'est pas impossible que, d'ici à quelques années, l'électro-chimie, non con-

tente de s'emparer de la préparation des aciers spéciaux, ne cherche à déposséder la plus puissante des industries chimiques de la fabrication du fer et des aciers courants.

Mais, si l'avenir de l'électrothermie est encore incertain, celui de l'électrolyse, en revanche, nous apparaît comme illimité. Elle opère aux températures ordinaires, où les corps simples peuvent s'associer en d'innombrables combinaisons ; tous ces échafaudages moléculaires, l'électricité, avec son ordinaire souplesse, est aussi habile à les former qu'à les détruire. Elle fournit déjà à l'industrie moderne quelques-uns de ses corps simples, le chlore, le fluor, l'oxygène, l'hydrogène, l'or, l'argent, le cuivre, le zinc, le nickel, l'aluminium ; elle a permis d'obtenir nombre de corps composés anciennement préparés par d'autres voies, dont nous avons cité quelques-uns ; elle nous en a donné d'autres, les percarbonates, les persulfates, les composés du vanadium qui, grâce à elle, font actuellement leur entrée dans l'industrie.

Mais c'est peut-être dans le domaine de la chimie organique que son rôle à venir est le plus important. Pour manier et transformer ces si délicates constructions d'atomes, il faut une main légère, sous peine d'en briser le fragile échafaudage ; les méthodes ordinaires de la chimie sont souvent brutales ; l'électricité, au contraire, apparaît comme l'ouvrier par excellence

de cette œuvre nouvelle. On s'en aperçoit déjà aujourd'hui. L'industrie sucrière l'utilise pour l'épuration des jus sucrés, et on cite des usines où plusieurs centaines de chevaux électriques sont attelés à cette tâche; le traitement des vins, le tannage des peaux, semblent vouloir utiliser à bref délai les procédés électriques; déjà, on remplirait des pages avec la liste des produits organiques obtenus par électrolyse, dont quelques-uns dans des conditions remarquables de pureté et d'économie : chloroforme, bromoforme, iodoforme, cyanures, vanilline et une série interminable de matières colorantes.

Voilà donc toute une branche de l'électro-chimie consacrée aux produits organiques, devant laquelle s'ouvre un avenir illimité; et ce qui la caractérise, c'est qu'elle n'exige pas, pour être productive, de grandes quantités de puissance électrique, obtenue à très bon compte. Les produits organiques se vendent, non à la tonne, mais au gramme; leurs éléments premiers sont les corps les plus communs de la nature; pour les assembler en ces délicates constructions moléculaires, il faut plus d'adresse que de force. Aussi, peu importe pour leur prix de revient que le courant soit engendré par des machines à vapeur ou par les turbines; c'est un élément accessoire. Il résulte de là que si, en ce qui concerne les autres industries électro-chimiques, les pays à puissances hydrauliques abondantes,

comme la France, sont privilégiés, ils sont tous sur le même pied pour la production des composés organiques.

C'est ce qu'ont admirablement compris les Allemands, et c'est pour cela qu'avec une vision nette du but à atteindre, ils préparent, dans leurs universités, la voie à l'avenir industriel de leur pays. Chez eux, des laboratoires, des revues spéciales sont consacrés exclusivement à la science nouvelle. Voici d'ailleurs les conseils qu'un de leurs savants les plus autorisés, M. Ostwald, donnait à ses compatriotes, au congrès de Göttingen de la Société allemande d'électro-chimie. Après avoir constaté que d'autres pays sont mieux placés que l'Allemagne pour la production de l'énergie électrique, il invitait ses compatriotes « à porter surtout leur activité vers la fabrication des corps qui possèdent une valeur de production, on pourrait dire une valeur intellectuelle. L'industrie des matières colorantes est un exemple à suivre ; il suffit de comparer le prix des couleurs avec celui des matières premières pour se rendre compte de quelle façon la valeur marchande d'un produit peut être plus de dix fois centuplée par addition d'intelligence. C'est par de semblables procédés qu'une nation assure sa domination dans le monde. »

Ainsi, les mêmes qualités de clairvoyante opiniâtreté qui ont monopolisé en Allemagne la

préparation des produits organiques vont à nouveau être mises en œuvre pour maintenir ce monopole. Plus que tous les autres, M. Haller, professeur à la Sorbonne, a appelé l'attention, en France, sur cette évolution des industries chimiques, sur l'intérêt qu'il y aurait, pour nos laboratoires, pour nos industries, à ne pas s'en désintéresser ; il faut souhaiter qu'il soit entendu, et qu'au moins dans quelques centres, à Paris, à Nancy, à Lyon, à Grenoble, des laboratoires puissent se spécialiser dans l'étude des problèmes électro-chimiques ; leurs efforts, on peut en être assuré, ne seraient pas stériles.

*
* *

En marquant, comme nous avons essayé de le faire, l'état actuel de l'électro-chimie, en essayant de deviner son avenir, nous avons peut-être péché par omission : rien ne nous assure que l'électro-thermie et l'électrolyse resteront éternellement les deux seuls moyens pratiques que l'électricité mette à notre disposition pour réaliser des réactions chimiques ; dès à présent, il en existe un autre, l'effluve électrique, mais si peu connu dans sa théorie, si nouveau dans ses applications, qu'il est impossible de se prononcer sur son avenir.

Il y a bien des années déjà, notre grand chimiste, M. Berthelot, utilisait pour certaines

réactions la décharge obscure et silencieuse qui jaillit entre deux conducteurs de large surface, reliés aux pôles d'une bobine d'induction ; avec elle, il parvenait, entre autres opérations, à transformer l'oxygène en cette modification allotropique aux affinités surexcitées qu'on appelle l'ozone. Depuis, les progrès de l'outillage électrique ont permis d'obtenir l'effluve dans des conditions d'intensité et d'économie inconnues à nos devanciers. La production de l'ozone est ainsi devenue industrielle, et ses applications commencent à se développer.

Une des plus importantes, la purification des eaux destinées à l'alimentation des villes, a fait dans ces dernières années de notables progrès. Des expériences effectuées, tant en France qu'en Allemagne et en Hollande, il résulte qu'en faisant barboter dans l'eau à purifier de l'air ozonisé par l'effluve, on parvient à y réduire le nombre des microbes de 50 à 70 p. 100 et à détruire presque complètement les substances organiques dissoutes ; des eaux très impures sont ainsi rendues nettement potables par l'intervention de l'électricité.

Mais d'autres chercheurs, et non des moindres, sont allés plus loin. Sir William Crookes, le très savant et très original physicien anglais, a fait, en 1898, devant le meeting de Bristol de l'Association britannique, une conférence infiniment suggestive et dont la lecture a eu le don de mettre

aux champs les imaginations des électrochimistes. L'acide nitrique, nous dit-il, et, par suite, les nitrates peuvent être obtenus par l'effluve : si l'azote de l'air ne brûle pas au contact de l'oxygène, si notre atmosphère tout entière ne s'embrase pas d'une seule flambée, c'est que sa température d'inflammation est supérieure à la température de combustion ; mais qu'intervienne l'effluve, elle fournira à l'atmosphère l'énergie supplémentaire requise, et alors ses deux gaz constitutifs pourront entrer en combinaison. L'expérience n'est pas nouvelle, elle a été faite il y a plus d'un siècle par Cavendish ; mais aujourd'hui, en tenant compte des prix pratiqués au Niagara pour la production de l'énergie électrique et des expériences de lord Rayleigh sur l'énergie nécessaire pour entretenir la réaction, on trouve que cette réaction, où les matières premières sont l'atmosphère même et le sel de la mer, permettrait d'obtenir le nitrate de soude au prix de 125 francs la tonne, alors que les nitrates du Chili reviennent à 187 francs. Dès à présent, c'est la perspective d'une industrie avantageuse ; pour l'avenir, quand les maigres réserves du Chili seront épuisées, c'est l'assurance d'un monopole.

Tel est le raisonnement de Crookes. Que manque-t-il pour passer de la théorie à l'acte ? Une mise au point industrielle d'une expérience de laboratoire. Or, grâce aux efforts de nom-

breux chercheurs, la question mûrit peu à peu. Les recherches effectuées en Suisse par M. de Kowalski ont permis d'obtenir une production régulière et d'abaisser encore notablement le prix de revient indiqué par Crookes en employant, au lieu de l'air ordinaire, de l'air enrichi en oxygène, que les liquéfacteurs Linde permettent aujourd'hui d'obtenir à très bas prix. D'ailleurs il existe déjà, aux chutes du Niagara, une société qui exploite industriellement les nouveaux procédés. Il est donc vraisemblable que les difficultés de tout ordre qu'on rencontre avant la parfaite mise au point d'une grande industrie, ne sont pas loin d'être vaincues. Qu'on en vienne à bout, et c'est alors pour l'électro-chimie un nouvel avatar, plus brillant que tous les autres; c'est l'électricité productrice du blé, et nourricière des hommes; besogne autrement importante que la préparation du carbure ou de l'aluminium, et qui suffirait à préserver du chômage toutes nos usines des Alpes. Nous n'en sommes pas encore là, mais il faut laisser le temps faire son œuvre; lui seul nous dira s'il s'agit d'un espoir sans lendemain, ou si vraiment l'électro-chimie est destinée à un tel avenir.

L'ÉCLAIRAGE PAR INCANDESCENCE

Les idées scientifiques reposent, depuis deux mille ans, sur la double conception de la matière et de la force, ou encore de la matière et de l'énergie, la première étant inerte par essence et faisant appel à la seconde pour modifier son état. Mais, à faire cette distinction, on a fini par prendre pour une réalité ce qui n'était qu'un artifice de raisonnement ; on s'est représenté l'énergie et la matière comme aussi distinctes que le seraient, pour certains philosophes, l'âme et le corps, et il faut, de temps en temps, se retourner vers la nature pour comprendre combien est loin d'elle cette fiction de dualité, cette théorie *spiritualiste* de l'univers. En fait, l'énergie et la matière forment dans le monde un tout indissoluble ; il est impossible de les séparer l'une de l'autre. La matière a pour propriété fondamentale, non pas d'être inerte, mais, au contraire, d'être dans un état perpétuel d'agita-

tion et de transformation. Les corps font incessamment commerce d'énergie ; l'activité du radium et de ses congénères est venue récemment illustrer cette propriété ; d'autres faits, plus anciennement connus, la rendent tout aussi manifeste.

Prenons un solide quelconque, par exemple un bloc de métal. Il est là, devant nos yeux, immobile en apparence ; en fait, sa masse prétendue inerte est pleine de mouvement et de vie ; chacune de ses particules est dans une incessante agitation, et l'espace qui l'environne est traversé par des trains d'ondes qui convoient l'énergie entre lui et le reste de l'univers. Seulement il reçoit autant qu'il donne, et c'est ce qui nous laisse l'impression qu'il est inerte : erreur aussi lourde que serait celle d'un économiste qui jugerait qu'un État n'est pas commerçant lorsque son exportation balance exactement son importation. Mais élevons, par un moyen quelconque, la température de notre bloc de métal. A mesure qu'il s'échauffe, son agitation interne va croissant ; l'importation d'énergie restant toujours la même, l'exportation augmente ; l'« équilibre mobile des températures », suivant le terme consacré, est rompu dans un sens, comme il le serait en sens inverse si on refroidissait le métal au lieu de l'échauffer. A mesure que le bloc s'échauffe, son rayonnement s'étend, non seulement en quantité, mais

encore en variété. Le thermomètre ou le sens du toucher nous montrent seulement l'accroissement total du rayonnement, mais l'œil va bientôt nous permettre des observations plus délicates :

Si nous regardons, dans une obscurité complète, le corps progressivement chauffé, nous verrons, dès qu'il a dépassé la température de 400 degrés, une lueur très faible, de coloration indécise, qui se précisera vers 500 degrés en un rouge encore très sombre. La température croissant, la lumière augmentera très rapidement, en même temps que sa nuance se modifiera, passant successivement au rouge cerise, à l'orange, au blanc, au blanc éblouissant¹. Ces faits sont d'observation courante ; chacun a pu les constater sur une barre de fer chauffée ; ils manifestent assez clairement que le rayonnement d'un corps varie, en quantité et en qualité, avec sa température. Mais les physiciens ont, à leur disposition, des instruments qui leur permettent de pousser plus loin l'analyse des phénomènes. Le plus utile en l'espèce est le *spectroscope* : la lumière, émise

1. Pendant longtemps, cette différence de coloration a constitué le seul procédé pratique, pour évaluer les températures élevées ; on utilisait, à cet effet, le tableau classique dressé par Pouillet sous le nom d'« échelle des teintes » :

Rouge naissant . . .	525°		Orange foncé	1 100°
— sombre	700		— clair	1 200
Cerise naissant . . .	800		Blanc	1 300
— proprement dit.	900		— soudant	1 400
Cerise clair	1 000		— éblouissant . . .	1 500

par le corps incandescent et reçue sur un prisme qui en sépare les différentes couleurs, est observée dans une lunette ; on peut même étendre grandement le champ des observations spectroscopiques en substituant à l'œil, à l'extrémité de la lunette, des thermomètres d'une extrême sensibilité, capables d'indiquer les différences de température d'un cent-millième de degré centigrade, et ce procédé a l'avantage de nous manifester les phénomènes dans toute leur généralité, car le thermomètre est sensible à toutes les radiations, qu'elles soient lumineuses ou obscures, en proportion de leur intensité, tandis que l'œil présente, pour les diverses radiations, une sensibilité très inégale. Voyons donc, avec les méthodes que l'analyse spectrale met à notre disposition, quelle sera la loi du rayonnement aux diverses températures.

Pour nommer les radiations visibles, les couleurs, notre langue a créé une nomenclature bien imparfaite, puisqu'elle ne comprend guère que sept ou huit termes, alors qu'il en faudrait des milliers pour distinguer l'infinie variété de teintes qui s'étend du rouge jusqu'au violet ; quant aux radiations invisibles, le langage les ignore. La science possède, par bonheur, un moyen parfait de désigner toutes les radiations, depuis qu'elle a établi que chacune d'elles est constituée par des vibrations d'une fréquence déterminée, le rouge correspondant à 400 tril-

lions de vibrations par seconde, le jaune à 500, le violet extrême à 700 trillions. Ainsi, chaque espèce de lumière, visible ou invisible, pourra être caractérisée et désignée par un nombre qui en indiquera en même temps la propriété essentielle, tout comme un son est défini par sa hauteur.

Voici, dès lors, ce qu'on constate : chaque radiation commence à apparaître à une température déterminée, et son intensité croît avec la température suivant une progression très accélérée. Les radiations apparaissent dans l'ordre de leur fréquence ; aux basses températures, le corps chauffé n'exporte que celles dont la fréquence est inférieure à 400 trillions, — ce sont les radiations purement calorifiques, qui échauffent sans éclairer ; au-dessus de 400 degrés, il commence à émettre les radiations rouges, puis jaunes, vertes, bleues ; la lumière violette apparaît à partir de 1.000 degrés ; et si la température continue à croître, d'autres radiations apparaîtront, plus rapides encore, que notre œil ne voit point, mais dont la présence nous est révélée, soit par leur action sur une plaque photographique, soit par l'illumination qu'elles produisent en frappant les corps fluorescents : la gamme des radiations s'étend et s'amplifie sans cesse, comme la mer en montant accroît sa profondeur en chaque point, et s'annexe en même temps de nouvelles parties du rivage. Ainsi, l'éther qui

baigne tous les corps charrie sans cesse, sous forme de vagues infiniment courtes et rapides, l'énergie qu'ils échangent entre eux ; les plus chauds donnent davantage, mais aucun ne reçoit sans donner : tel est le frémissement incessant qui se cache sous le calme apparent de la nature ; et notons qu'il ne s'agit pas ici d'hypothèses plus ou moins vraisemblables, mais de faits indéniables et cent fois contrôlés ; tout, y compris les nombres formidables cités plus haut, est aussi assuré que l'existence même des corps qui nous entourent.

Un point encore est à noter. Il aurait pu arriver que chaque corps eût une loi propre de rayonnement, en relation avec sa nature chimique ou avec l'état de sa surface ; or, à voir les choses d'un peu haut, et en négligeant quelques cas exceptionnels, le rayonnement est le même, à surface et à température égales, pour tous les corps solides : un centimètre carré de charbon, d'oxyde de fer ou encore de platine, portés à la même température, émettront les mêmes radiations et en proportions égales. Une observation bien simple, que chacun de nous a pu faire, en fournit la preuve. Regardons, par une ouverture étroite, l'intérieur d'une enceinte dont tous les points soient à la même température, d'un four à porcelaine par exemple, ou encore d'un four à puddler : tous les points de cette enceinte et les corps placés dans son intérieur nous

paraîtront également éclairés et de la même nuance, quelle que soit la température générale de l'enceinte; or dans l'intérieur d'un four à puddler se trouvent en même temps les parois de brique réfractaire, des escarbilles de coke, les gueuses de fonte dont certaines parties sont métalliques et d'autres recouvertes d'oxyde ou de laitier; tous ces corps ont pourtant même éclat et même coloration, et c'est à grand'peine qu'on peut distinguer leurs contours: n'est-ce pas une preuve indéniable que, portés à la même température, ils rayonnent semblablement?

*
*
*

Si les solides et les liquides incandescents émettent, à haute température, toute la gamme de radiations dont nous avons parlé tout à l'heure, en revanche, les gaz et les vapeurs se caractérisent par la pauvreté de leur émission: qu'on regarde la flamme bleuâtre des fourneaux à gaz en usage dans nos cuisines, ou encore celle de l'hydrogène brûlant dans l'air; on pourra constater qu'elles sont à peine éclairantes; pourtant, leur température est voisine de deux mille degrés, et il suffit de plonger dans ces flammes un fil fin de fer ou de platine pour le voir, porté au rouge blanc, projeter une

vive lumière ; si les flammes d'un bec de gaz, de l'acétylène ou d'une lampe sont vivement éclairantes, cela tient à ce qu'elles renferment en suspension des particules de carbone *solide*, rendues lumineuses par la chaleur du gaz en combustion qui les entoure¹.

Si donc, nous voulons utiliser pour l'éclairage les radiations des corps chauffés, nous sommes amenés à une série de conséquences qu'il est facile maintenant de formuler. En premier lieu les gaz incandescents n'ayant qu'une médiocre radiation, ne pourront concourir à l'éclairage qu'indirectement, en échauffant d'autres corps ; c'est le cas des flammes éclairantes du bec Auer, ou encore de la lumière Drummond, dans laquelle un bâton de chaux ou de magnésie est porté à haute température par le jet d'un chalumeau oxyhydrique.

Comme, d'autre part, on ne voit pas quel dispositif pratique permettrait d'utiliser l'éclat des liquides, tels les métaux fondus, portés à haute température, il résulte de là que, nécessairement, c'est aux solides qu'il a fallu s'adresser pour réaliser les formes connues d'éclairage par incandescence, et non pas à un solide quel-

1. Chacun sait qu'il suffit de placer une assiette au contact de la flamme pour recueillir ces particules de carbone sous forme d'enduit noir ou de suie, et, d'autre part, qu'on obtient les flammes non éclairantes en brûlant complètement le carbone par un afflux d'air suffisant, de telle sorte que la flamme ne contienne plus aucun élément solide.

conque, mais spécialement à ceux qui, aux températures élevées, ne sont ni décomposables ni volatils. Entre tous ces corps, le charbon a été jusqu'ici presque exclusivement employé, et c'est pourquoi on a pu dire que toute la lumière artificielle nous était fournie par l'incandescence du carbone : c'est elle qui nous éclaire dans la flamme des bougies, dans celle des lampes à huile ou à pétrole, dans la lampe à incandescence et dans l'arc électrique, dont l'éclat provient, pour plus des neuf dixièmes, des charbons entre lesquels il éclate ; ce n'est là pourtant qu'une vérité toute relative, et nous verrons bientôt que rien ne s'oppose à ce que d'autres solides soient substitués au carbone.

Une seconde conséquence des notions générales que nous avons acquises, c'est que la nuance de la lumière émise par les corps incandescents varie, suivant l'échelle des teintes, de telle façon que les sources les plus chaudes donneront la lumière la plus blanche en même temps que l'éclat le plus grand, c'est-à-dire la plus grande somme de radiation lumineuse pour chaque centimètre carré de leur surface. Même, avec l'arc électrique, dont la température maxima peut atteindre 4 000 degrés, les radiations bleues et violettes ont pris, relativement aux autres, une telle prédominance, que la lumière émise nous paraît, non plus blanche,

mais nettement bleuâtre. Nous savons, depuis les travaux du physicien américain Langley, que le soleil, dont la température est encore bien supérieure à celle de l'arc, nous envoie de la lumière parfaitement bleue, et qui nous paraîtrait telle si nous pouvions aller la recevoir aux confins de notre atmosphère ; mais l'air et surtout la vapeur d'eau absorbent en grande quantité les radiations violettes et bleues, au point de ramener la radiation du soleil, telle que nous la percevons, à la couleur blanche. Parfois même, l'absorption est plus grande encore, surtout au lever et au coucher des astres, quand leurs rayons traversent obliquement des couches atmosphériques plus voisines du sol, partant plus denses et plus humides ; c'est à cette extinction du violet et du bleu que nous devons les doigts de rose de l'aurore et la splendeur de nos couchers de soleil. La couleur blanche de la lumière solaire ne serait donc pas ce qu'elle est si la température de cet astre était différente, si notre atmosphère était plus épaisse ou plus chargée de vapeur d'eau ; elle est, non pas l'absence de couleur, mais une couleur comme les autres.

Mais il faut encore étudier les choses sous un autre aspect : il faut considérer le *rendement optique* des corps incandescents, c'est-à-dire le rapport de l'énergie lumineuse à l'énergie totale rayonnée par ces corps, et c'est ici que nous

allons toucher du doigt le défaut capital de tous nos procédés d'éclairage. Les corps incandescents ne fabriquent pas seulement des radiations lumineuses ; en deçà et au delà du spectre visible s'étendent les gammes successives de l'infra-rouge et de l'ultra-violet ; nous ne recueillons sous forme de lumière qu'une part de l'énergie dépensée pour échauffer les corps incandescents, et l'on ne sait pas assez combien cette fraction utilisée est dérisoire : ainsi, le rendement optique d'une bougie n'atteint que quatorze cent-millièmes, c'est-à-dire que, sur cent mille calories libérées par suite des réactions chimiques qui s'accomplissent dans la flamme, quatorze seulement sont représentées par des radiations visibles ; tout le reste est inutile, et la majeure partie de cet énorme déchet, manifestée sous forme de chaleur, est plutôt une cause de gêne. Et ce résultat peut encore s'exprimer en disant que, dans un paquet de bougies de 500 grammes, qui peut nous fournir l'éclairement d'une bougie pendant un peu plus de deux jours, il y aurait assez d'énergie pour nous donner la même lumière pendant près d'un demi-siècle, si nous savions transformer toute cette énergie en lumière.

Considérons maintenant le tableau suivant, où sont consignées les mesures, effectuées pour un certain nombre de sources lumineuses, du rendement optique et de la température :

Source lumineuse.	Rendement optique.	Température.
Bougie de l'Étoile	0,00014	1 200 ^o
Bec de gaz Bengel	0,00018	1 300
Lampe à incandescence (peu poussée)	0,00050	1 700
Bec à récupération	0,00053	1 750
Lampe à arc	0,00250	3 500
Soleil	0,01400	7 500(?)

A première vue, on constate que le rendement optique va en croissant très rapidement avec la température de la source : c'est dans cette simple constatation que gît l'explication de la plupart des progrès réalisés depuis un siècle ; on a employé des sources lumineuses de plus en plus chaudes, et du même coup on a obtenu un double résultat : une amélioration notable de rendement et une modification de la nuance, cette dernière étant d'ailleurs d'importance accessoire, car, si les lumières blanches ou bleuâtres des sources les plus chaudes peuvent paraître fatigantes ou désagréables, rien n'est plus facile que de les ramener, par l'emploi de verres colorés, à la nuance voulue, et cela sans dépréciation notable du rendement.

*
* * *

Nous possédons maintenant la clef de la méthode générale suivie, consciemment ou par empirisme, pour perfectionner les procédés

actuels d'éclairage, qui sont tous fondés sur l'incandescence des corps solides. Rien de plus facile, dès lors, que de comprendre l'évolution dont nous avons été témoins. Mais, pour rendre les choses plus simples et plus claires, nous nous limiterons à ce que les spécialistes nomment proprement l'incandescence ; laissant de côté les flammes et l'arc électrique, qui pourtant relèvent des mêmes principes généraux et méritent aussi bien d'être considérés comme des corps incandescents, les électriciens et les « gaziers » professionnels réservent le nom d'éclairage par incandescence électrique aux dispositifs qui utilisent des filaments solides chauffés par le passage du courant, et ils nomment incandescence par le gaz le mode d'éclairage réalisé à l'aide des manchons Auer.

Il serait aujourd'hui bien oiseux de décrire la lampe à incandescence électrique ; chacun sait que, traversant un mince filament de carbone, qui est scellé dans une ampoule soigneusement purgée d'air, le courant l'échauffe jusqu'à la température où son rayonnement équilibre l'apport d'énergie dû à l'électricité. On peut donc, en réglant convenablement la résistance électrique du filament et la tension, ou voltage, de la source électrique qui l'alimente, faire varier la température atteinte et, par suite, le rendement optique de la lampe en même temps que la couleur de la lumière émise. Il semble

résulter de ce qui a été dit qu'il y a intérêt à élever autant que possible cette température, à « pousser » les lampes au maximum. Rien n'est plus exact en principe : mais, dans l'application, le filament s'altère par l'usage ; les proportions relatives de carbone ordinaire et de graphite qui le constituent se modifient, en même temps qu'une partie du filament, lentement volatilisée, vient se déposer sur l'ampoule et en obscurcir les parois ; toutes ces modifications sont d'autant plus rapides que la lampe est poussée davantage ; si même la température du filament avoisinait deux mille degrés, quelques minutes de ce régime excessif suffiraient pour déterminer sa rupture et mettre la lampe hors de service.

Tout se ramène dès lors à un compromis entre le prix de revient de la lampe et celui de l'énergie électrique qui l'alimente. La lampe est-elle d'un prix élevé ? Il y a intérêt à la ménager en lui demandant moins de lumière. C'était le cas à l'origine ; mais, à présent, le prix d'une lampe du type courant est tombé de cinq francs à cinquante centimes et, pendant les quatre cents heures de sa vie normale, sa consommation d'énergie électrique atteint une vingtaine de francs ; il convient donc, pour utiliser au mieux cette énergie, de pousser la lampe jusqu'à une température qui peut atteindre mille huit cents degrés, quitte à la remplacer impitoyablement au bout de trois cents à quatre cents heures de

service effectif : agir autrement serait d'une économie aussi mal comprise que d'user jusqu'au bout la mèche d'une lampe à pétrole.

Mais si l'altérabilité des filaments minces de nos modernes lampes à incandescence oblige à les pousser modérément, il n'est pas impossible, toutefois, d'obtenir un meilleur rendement. Un électricien éminent, M. Blondel, s'est attaché, en effet, à montrer que les lampes à gros filaments résistent mieux que les autres et peuvent être amenées à une température voisine de 1 850 degrés sans éprouver une altération trop rapide; de l'emploi de ces ampoules, résultera donc une nouvelle économie. Avec les lampes à incandescence primitives, pour produire une « bougie-heure », c'est-à-dire pour maintenir pendant une heure l'intensité d'une bougie, il fallait dépenser une énergie électrique voisine de 1 800 kilogrammètres; le même résultat, avec les lampes actuellement en usage, n'en exige plus que 1 200, et cette dépense d'énergie se réduirait à 900 par l'emploi des lampes à gros filament. L'économie est appréciable, mais il faut considérer aussi l'envers de la médaille : les lampes à gros filament du type courant ne peuvent fonctionner isolément sur les canalisations actuellement en usage, où la tension admise est généralement de 110 volts; il faut alors grouper ces lampes par séries de cinq que traverse ensemble une même dérivation, ou

bien employer le courant alternatif et joindre à chaque lampe un petit transformateur destiné à abaisser le voltage aux limites requises. De fait, aucune de ces deux solutions n'entraîne de grandes complications; mais chacune d'elles exige de la clientèle une résignation moins passive, et la volonté d'obtenir un maximum de lumière avec un minimum de dépense.

Mais, malgré tout, l'emploi de filaments en charbon limite toujours étroitement la température maxima des lampes à incandescence. Aussi, des milliers de brevets, pris depuis dix ans, attestent-ils les efforts des électriciens pour obtenir un filament plus inaltérable. Tout, semble-t-il, a été essayé, avec un médiocre succès; tous les carbures, tous les siliciures ont été passés en revue et, en fin de compte, une seule substance paraît avoir quelques-unes des qualités requises pour être substituée au carbone: c'est l'osmium. M. Auer, le très habile chimiste autrichien, qui a renouvelé l'éclairage au gaz par l'emploi du manchon incandescent, s'est attaché pendant de longues années à rendre pratique la lampe à incandescence à filament d'osmium. Ses procédés, brevetés depuis 1900 et appelés, dit-on, à une très prochaine exploitation industrielle, sont imparfaitement connus; il est acquis, cependant, qu'on est parvenu à réduire en filaments élastiques l'osmium, qui n'était connu jusqu'ici que comme

un métal cristallin, cassant et très difficile à travailler. La lampe à osmium, expérimentée dans plusieurs laboratoires, est capable de fournir, pendant un millier d'heures, un éclairage fort économique puisque le maintien d'une bougie-heure ne correspond qu'à une dépense de 550 kilogrammètres. Cet avantage serait compensé, il est vrai, par le prix plus élevé de la lampe, mais d'autre part le filament usé serait loin d'être sans valeur. Seule, une exploitation industrielle permettra de faire la balance des inconvénients et des avantages.

*
*
*

On peut se montrer, dès à présent, plus affirmatif au sujet du mode d'éclairage inventé en 1897 par le professeur Walther Nernst, de Gottingue. Il n'est personne qui n'ait entendu parler de cette lampe plus merveilleuse que celle d'Aladin, qui ne l'ait vue, aux expositions ou dans certains magasins, se faire à elle-même la plus brillante des réclames. Examinons pourtant la chose de plus près.

On sait que la conductibilité électrique des corps varie, comme la plupart de leurs propriétés, avec la température; celle des métaux diminue à mesure qu'on les chauffe; au contraire, celle du filament de carbone des lampes à incandescence augmente, et est deux fois plus

grande à 1800 degrés qu'à froid. Cette variation est donc un phénomène très général, mais il est certains corps chez lesquels elle s'exagère remarquablement : tels sont la plupart des oxydes, des sulfures, des phosphates, des silicates, qu'on a appelés *conducteurs de seconde classe*. Ces corps ont, à la température ordinaire, une conductibilité tellement faible, qu'on peut les considérer pratiquement comme des isolants; mais, dans le voisinage du rouge, leur conductibilité commence à prendre une valeur appréciable, puis croît très rapidement avec la température. Le fait avait déjà été signalé en 1868 par M. Le Roux, et Jablochkoff en avait fait l'application, en 1877, aux bougies électriques qui portent son nom; deux crayons parallèles de charbon étaient séparés par une couche de kaolin; l'arc jaillissant entre les deux crayons volatilisait peu à peu cet isolant dont l'usure suivait celle des charbons; mais en même temps, la partie du kaolin voisine de l'arc était chauffée par lui jusqu'à devenir conductrice; le courant qui la traversait la maintenait à température élevée, et son rayonnement formait ainsi une notable part de la lumière émise par la bougie.

Mais au moment où Nernst retrouva la propriété des conducteurs de seconde classe pour en faire l'application que tout le monde connaît, cette propriété était presque oubliée par les

savants et inconnue des industriels. Il serait donc souverainement injuste de déprécier un mérite qui reçut, d'ailleurs, une double récompense, car les brevets Nernst, en outre de la juste notoriété qu'ils acquirent à son auteur, furent achetés par la puissante Société allemande *Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft* au prix d'un million; le savant professeur de Gottingue, non content de récompenser par un don de cent mille francs l'ouvrier dont l'habileté lui avait permis de réaliser sa première lampe, consacra au laboratoire de l'Université où il enseigne, la majeure partie de la somme restante. Une fois mise entre les mains des industriels, l'invention de Nernst fut encore soumise, de 1897 à 1900, à une série d'études techniques destinées à la rendre tout à fait pratique, en même temps qu'une série de réclames, savamment graduées, créait dans le public le désir impatient d'être mis en possession de la nouvelle lampe qui devait reléguer à côté des quinquets à l'huile les plus modernes procédés d'éclairage.

Sous sa forme actuelle, la lampe Nernst se compose essentiellement d'un petit bâtonnet de magnésie¹ agglomérée par des silicates, ayant deux à trois millimètres de diamètre et quinze millimètres de longueur; des raccords en pla-

1. Parfois remplacée par des mélanges d'autres corps, par exemple les oxydes de zirconium et d'yttrium.

tine servent à le mettre en relation avec la canalisation électrique. Une fois chauffé vers 600 degrés, le bâtonnet devient conducteur, le courant le traverse, y use son énergie qui s'y convertit en chaleur comme dans le filament de charbon des lampes à incandescence, et, alors, plus n'est besoin de chauffer le cylindre; le courant suffit seul à cette tâche et, en même temps, décompose la magnésie, devenue conductrice, en ses deux constituants : le métal magnésium, qui se forme au pôle négatif, et l'oxygène, qui est libéré au pôle positif; c'est d'ailleurs pour cette raison que le bâtonnet ne doit pas être maintenu dans le vide, car il serait rapidement détruit par l'électrolyse, tandis qu'au contact de l'air le magnésium se réoxyde à mesure qu'il se forme, et la magnésie subsiste inaltérée; c'est pourquoi le procédé inventé par Nernst a reçu le nom d'« incandescence à l'air libre ».

Réduite à son cylindre de magnésie, la lampe Nernst serait loin de fournir le service automatique qu'exige le consommateur; pour en faire un générateur pratique de lumière, il faut lui adjoindre deux dispositifs supplémentaires et, en premier lieu, un dispositif d'allumage. Pour que le courant passe, en effet, il ne suffit pas de tourner le bouton d'un commutateur, il faut encore porter la magnésie au rouge sombre. On obtenait primitivement ce résultat en la chauff-

fant directement à l'aide d'une lampe à alcool. Dans les lampes actuelles, le bâtonnet est entouré d'une spirale métallique que le courant traverse tout d'abord et qui produit la chaleur nécessaire ; dès que la température voulue est atteinte, le jeu automatique d'un petit électro-aimant met la spirale chauffante hors circuit. Quelque ingénieuse que soit cette solution, elle n'en présente pas moins l'inconvénient que la période d'allumage dure au minimum trente secondes, et c'est beaucoup pour un public habitué au fonctionnement instantané des lampes à incandescence ordinaires. Mais une autre complication, encore, est nécessaire : à mesure que la magnésie devient plus conductrice, elle se laisse traverser par un courant plus fort ; la chaleur dégagée augmente, par suite la température s'élève, la lampe « s'emballe » jusqu'à fusion des attaches en platine et rupture consécutive du circuit. Il faut compenser cette conductibilité croissante du bâtonnet et maintenir une intensité stable du courant ; ce résultat est obtenu d'une manière très pratique en intercalant dans le circuit un fil de fer très fin dont la résistance, au rebours de celle de la magnésie, croît avec la température.

Avec tous ces accessoires, la lampe Nernst fonctionne d'une façon satisfaisante ; le cylindre éclairant peut durer trois à quatre cents heures ; pendant ce laps de temps, il fournit une lumière

véritablement éblouissante, explicable par sa température voisine de trois mille degrés ; son rendement optique atteint 1,5 p. 100, c'est-à-dire que, parmi les lumières artificielles, l'arc seul est plus économique, mais sans posséder les qualités qui rendent la lampe Nernst, comme l'ampoule d'Edison, particulièrement appropriée à l'éclairage intérieur. Il n'empêche que, après quatre années d'exploitation industrielle, et malgré l'abondance de la réclame, la lampe à incandescence à l'air libre ne paraît pas faire aux autres modes d'éclairage une concurrence victorieuse. La complication de ses organes, ayant pour conséquences leur fragilité et un prix d'achat assez élevé, et principalement la lenteur de l'allumage sont à coup sûr des inconvénients sérieux ; il faudrait qu'ils fussent sérieusement atténués pour que l'invention de Nernst réalisât les espérances qu'elle avait fait concevoir à l'origine.

*
*
*

Jusqu'ici, nous avons eu la satisfaction de voir le progrès industriel se poursuivre, avec une parfaite logique, suivant les lois générales posées par la science ; il en serait toujours ainsi, si la science n'avait des lacunes. Les larges routes qu'elle trace à travers la nature ne mènent pas partout, et les aventuriers qui s'en

écartent font parfois d'étranges découvertes.

Pareille fortune est échue, en 1885, au chimiste autrichien Auer von Welsbach ; sa découverte, arrivée au moment où l'éclairage électrique s'apprêtait à terrasser son rival, l'éclairage au gaz, a donné aux gaziers des armes nouvelles ; elle a joué par suite un rôle social considérable, mais elle présente aussi un grand intérêt scientifique, car elle nous montre que les lois du rayonnement, que nous avons données comme générales, souffrent pourtant des exceptions.

M. Auer a raconté lui-même ¹ l'histoire de sa découverte ; nous en reproduisons l'abrégé : le lecteur y trouvera, sur le fait, cet ensemble de soudaines révélations et de recherches rebutantes dont est tissée l'histoire de la plupart des inventions :

« En 1880, dit Auer, je m'occupais de la chimie des terres rares ². Mais les petites perles d'oxydes qu'on prépare ordinairement à l'extrémité d'un fil de platine et qu'on chauffe dans une flamme ne permettent guère d'obtenir des spectres très lumineux et d'en étudier les radiations. Je

1. *Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*, 1901.

2. Les chimistes désignaient autrefois sous ce nom des minéraux naturels très rares, et contenant des oxydes voisins de la chaux et de la magnésie : oxydes de zirconium, cérium, lanthane, thorium, etc.

cherchai donc à disposer les oxydes dans la flamme de telle sorte que l'émission fût plus intense ; je pensai, tout à fait par hasard, à imbiber avec une solution de sels de ces oxydes une trame de coton et à calciner ensuite ; il semblait probable que cette expérience n'aurait aucun succès et que le squelette d'oxydes restant après combustion n'aurait aucune cohérence ; l'épreuve réussit cependant, et les terres conservèrent la forme du coton. Quand je rendis, peu de temps après, visite à mon vieux maître Bunsen, à Heidelberg et que je lui expliquai mon procédé, il secoua la tête et me dit qu'il jugeait invraisemblable qu'on pût obtenir par ce moyen une masse résistante ; aussi fut-il grandement étonné en voyant comment j'obtenais mes manchons.

« Au cours de ces recherches, je remarquai un composé dont le pouvoir émissif était très considérable ; c'était l'oxyde de lanthane ; c'est lui qui me suggéra l'idée d'employer les terres rares pour une production économique de la lumière. Par malheur, si le manchon d'oxyde de lanthane était parfait, il me donna pourtant ma première désillusion. Je m'absentai plusieurs jours en l'enfermant avec soin et, lorsque je revins, il était tombé en poussières. D'autres fois encore j'éprouvai la même déception : ma première joie avait été courte. Je dirigeai alors mes tentatives sur les mélanges à base d'oxyde de zirconium ; les résultats furent meilleurs ; la lumière

était bonne et la durée du manchon atteignait quelques centaines d'heures. Encouragé par ce succès, j'expérimentai aussi sur l'oxyde de thorium, et je constatai avec surprise que les mélanges qui en renfermaient donnaient une brillante lumière. Ces expériences prouvèrent que certains mélanges d'oxydes constituent de véritables combinaisons, et émettent une lumière particulièrement intense lorsqu'ils sont placés en treillis très fin autour de la flamme.

« Je fis alors aux représentants de la presse viennoise une conférence dans le laboratoire du professeur Lieben ; les comptes rendus, pour la plupart bienveillants, firent connaître mon invention au public et ce fut M. Scaps, rédacteur au *Neue Wiener Tageblatt*, qui la baptisa du nom d'« incandescence par le gaz ». Mais d'autres personnes affectaient un grand scepticisme. Tel industriel s'offrait à parier, contre n'importe qui, qu'on n'installerait pas mille becs par an ; tel autre, sollicité de s'intéresser à cette industrie, refusa en répondant que sa maison ne s'occupait que d'affaires sérieuses. Ces réponses n'ébranlaient pas ma confiance. Par bonheur, obligé d'abandonner quelque temps mon travail, je trouvai pour le continuer un homme très distingué, M. Haitinger, à qui je dois une grande reconnaissance. C'est lui qui observa l'importance de la combinaison du cérium ; il soumit les substances à une analyse exacte et put ainsi livrer

un assez bon produit. Je revins ensuite reprendre mes travaux et fis des centaines d'essais, à peu près inutiles, pour augmenter la luminosité des manchons.

« Cette période fut pour moi bien pénible ; les bailleurs de fonds s'impatientsaient et me menaçaient de procès, au lieu de me laisser travailler en paix. On ferma la fabrique de manchons d'Atzgerdorf, mais je l'achetai et j'y restai seul. La nécessité rend ingénieux ; il fallait aboutir ; de nouveau et en vain, j'expérimentai tous les corps possibles ; les procédés ne paraissaient pas perfectibles. Pourtant, ayant repris l'étude du thorium, corps alors très rare et très coûteux, je découvris quelques méthodes nouvelles pour le traiter et le purifier, et je constatai alors que, plus le sel de thorium employé était pur, moins le manchon qu'on préparait avec lui était lumineux. Des expériences ultérieures me permirent de déterminer la nature du corps qui, uni au thorium, déterminait la luminescence. Ce corps, voisin du thorium et dont les sels sont retenus par les sels de thorium, n'était autre que le cérium.

« Dès lors, je n'eus plus qu'à mélanger, par petites portions, une solution de cérium à une solution pure de thorium, à imbiber mes manchons du mélange, et j'obtins la lumière éclatante que chacun connaît. Le pouvoir émissif du nouveau manchon était à peu près triple de

celui des anciens et sa durée était aussi plus grande. Au commencement de 1890, je lançai le nouveau mode d'éclairage dans le public ; les manchons étaient composés, dès ce moment, de 99 p. 100 d'oxyde de thorium et 1 p. 100 d'oxyde de cérium. La valeur de mes brevets était alors tombée à un minimum et il était grand temps d'aboutir, car je risquais de perdre les derniers fidèles que j'avais encore. »

A partir de 1890 commence la récompense de tant d'efforts, et le triomphe industriel le plus complet dont on puisse citer l'histoire ; mais la science y trouvait encore son bénéfice : les terres rares n'étaient guère connues, avant 1890, que par quelques échantillons contenus dans les collections minéralogiques ; il fallait en trouver des sources plus abondantes pour réaliser la production en grand des manchons. Bientôt, les prospecteurs de la Société Auer découvrirent dans les terrains aurifères de l'Oural, du Brésil, de l'Amérique du Nord, de la Tasmanie, des gisements considérables d'une substance nommée *monazite*, déposée en lits de sables denses et brillants, qui avaient donné plus d'une déception aux chercheurs d'or. Or, la monazite est formée principalement d'un mélange de phosphates de ces corps rares. Ainsi se créa une industrie des terres rares ; des produits à peine connus des chimistes se vendirent brusquement au kilo : la *Welsbach light Company*, de Gloucester City

(N. J. États-Unis) possède une réserve de sels de cérium s'élevant à une dizaine de tonnes et produit annuellement plusieurs tonnes des différents sels de lanthane, de zirconium et de thorium. L'industrie a donc payé largement sa dette à la science pure; grâce à la découverte d'Auer, une demi-douzaine de corps simples, avec toutes leurs combinaisons, sont entrés brusquement dans la vie des laboratoires.

Et d'autre part, l'énigme posée à la science par la découverte d'Auer n'est pas encore résolue. Pourquoi la radiation du manchon incandescent est-elle différente de celle de tous les autres corps placés dans les mêmes conditions? Un manchon au thorium pur donne une lumière d'un bleu blafard, dont l'intensité vaut deux bougies; un autre, fait avec l'oxyde de cérium, donne sept à huit bougies sous forme d'une lumière rougeâtre, tandis qu'en associant ces deux corps dans la proportion de 1 de cérium pour 99 de thorium, on obtient, avec la même dépense de gaz, une lumière de 70 bougies au début, qui se maintient au-dessus de 50 bougies pendant un millier d'heures; et il ne faut pas s'écarter beaucoup des proportions indiquées sous peine de diminuer notablement la luminescence.

Certains physiciens expliquent les faits en montrant que le manchon a un plus grand pouvoir émissif que les autres corps dans les régions

jaune, verte et bleue du spectre. L'opium, pareillement, fait dormir en vertu de sa propriété dormitive. Pour d'autres physiciens, l'oxyde de cérium favorise la combustion des gaz de la flamme, ce qui est un fait constaté expérimentalement; il en résulte une élévation de température que le manchon traduit par une émission plus grande. Le professeur Bunte confirme cette théorie en indiquant le rôle joué par le thorium : ce corps se présente dans le manchon sous forme d'une masse boursouflée constituée par des filaments extrêmement fins ; cette matière très poreuse et par suite très mauvaise conductrice sert de support à l'oxyde de cérium dont les particules peuvent être portées à une température supérieure à 2000 degrés sans perdre de chaleur par conductibilité du manchon ; et alors on pourrait dire que l'oxyde de cérium est l'élément actif, celui qui émet principalement les radiations, et que son rendement optique excellent tient uniquement à la température élevée qu'il atteint dans la flamme. Ce n'est là, il faut le dire, qu'une hypothèse, et il est probable que l'explication véritable est encore à trouver.

*
* *

Quoi qu'il en soit, trente ans de labeur scientifique ont accumulé bien des découvertes et amené bien des progrès. Nous sommes loin du

temps où Goethe pouvait dire qu'il ne voyait guère d'invention plus utile que celle d'une chandelle brûlant sans être mouchée. Nous avons eu la satisfaction de constater un progrès continu et méthodique, dû à un emploi de plus en plus rationnel de la même méthode générale : l'incandescence des corps solides. Le rendement optique des sources actuelles de lumière est dix à vingt fois meilleur que celui des chandelles de cire et des lampes à l'huile dont l'humanité s'est contentée jusqu'au début du XIX^e siècle ; en même temps, leur coloration a viré progressivement du jaune au blanc, et ce double résultat est dû à l'emploi de foyers lumineux de plus en plus chauds.

Mais chaque pas en avant nous rend plus exigeants ; il semble que la nuit nous irrite et nous gêne. L'éclairage au gaz de nos rues a constitué un grand progrès, et pourtant on se contentait, il y a cinquante ans, d'une quantité de lumière qu'on peut évaluer à un dixième de bougie par mètre carré ; aujourd'hui, sur les principales artères de nos grandes villes, l'éclairage est voisin de trois bougies par mètre carré. Il faut encore cinq fois plus de lumière pour éclairer la scène de nos théâtres, où le public peut chaque soir contempler des effets lumineux qui dépassent assurément ceux de la grande fête donnée par Louis XIV au palais de Versailles, où deux mille chandelles de cire,

servies par cinquante moucheurs, entretenaient, au dire de Saint-Simon, une clarté éblouissante.

Si la lumière nous coûte vingt fois moins qu'il y a un siècle, en revanche, nous en usons des centaines de fois davantage. Le problème de la lumière artificielle est donc chaque jour plus pressant; il l'est d'autant plus que la science, en nous aidant à le résoudre, nous a montré combien nous étions encore éloignés d'une solution économique. L'emploi des méthodes d'incandescence ne paraît qu'un pis-aller, malgré les merveilleux résultats de ces dernières années; on ne voit pas, en effet, que ces méthodes puissent fournir les radiations lumineuses autrement que mélangées à d'autres radiations non éclairantes, et surtout à des radiations calorifiques; et pourtant, la *lumière froide* n'est pas un mythe; la nature nous la montre dans le rayonnement du ver luisant et d'autres animaux qui fabriquent exclusivement des radiations lumineuses.

C'est déjà quelque chose que de savoir que le problème n'est pas insoluble; mais il paraît difficile, à l'heure présente, de prévoir à quels phénomènes nos successeurs pourront demander la lumière de l'avenir. A moins que le hasard ne vienne brusquer les choses, il faudra procéder logiquement et étudier les animaux photogéniques jusqu'à ce qu'on ait découvert les procédés par lesquels s'élabore leur radiation. Mais quand saura-t-on percer ce mystère?

LA SCIENCE ET LES APPLICATIONS DU FROID

L'histoire des hypothèses scientifiques est aussi celle des erreurs successives de l'esprit humain; elle n'est pourtant pas inutile; chacune de ces hypothèses résume et représente l'état des connaissances positives contemporaines, et, à mesure que ces données expérimentales se multiplient et se précisent, la théorie, sans pénétrer au fond des choses, en donne tout au moins une image plus nette et plus accusée.

Cette ascension progressive vers le vrai n'est nulle part plus sensible que dans la recherche des causes du chaud et du froid. Obéissant à une pente naturelle de son esprit, l'homme a commencé par attribuer à deux agents distincts et antagonistes les sensations opposées que lui causent les variations de sa propre température; comme il ne connaissait d'eux que le nom qu'il leur avait donné, il se les est figurés sem-

blables à des gaz, mais plus subtils et plus impondérables encore, imbibant tous les corps comme l'eau remplit une éponge, et déterminant par leurs proportions relatives les différents états de chaleur et de froid; et, comme il ne paraissait pas y avoir de limites à l'accumulation de la chaleur dans les corps, on n'en voyait pas davantage à l'accumulation du froid.

Cette théorie tout intuitive et si imprécise des deux fluides devait prendre, au xviii^e siècle, une forme plus précise et plus simple: l'Allemand Stahl, fit alors pour la chaleur ce que Franklin allait faire, quelques années plus tard, pour l'électricité, en montrant qu'un fluide unique pouvait suffire à l'explication des faits connus de son temps; cet agent, nommé phlogistique par les chimistes, et calorique par les physiciens, était censé exister en abondance dans les corps chauds, en moindre quantité dans les corps froids, et se trouver emprisonné, à l'état latent, dans les combustibles, d'où l'acte de la combustion avait pour effet de le libérer.

Pour invraisemblable qu'elle nous paraisse aujourd'hui, cette vision des choses n'en a pas moins suffi aux sciences jusqu'au milieu du siècle dernier, mais elle entraînait avec elle une conséquence qu'on n'aurait pu tirer de la théorie des deux fluides: s'il est toujours possible d'accumuler indéfiniment la chaleur dans les corps, en revanche on n'imagine plus la possibilité de

les refroidir sans limite ; un état doit exister où, vides de tout calorique, les corps ont atteint la limite inférieure du froid.

Ainsi s'introduisait, pour la première fois, dans la science, une idée qui devait y faire son chemin, surtout du jour où le grand principe de la conservation de l'énergie, en s'imposant aux esprits modernes, parut la porter avec lui comme un corollaire. Ce jour-là, les physiciens, las d'étreindre des formes fugitives, crurent réellement avoir pénétré le mystère des choses. Ils voyaient la matière, formée de corpuscules ou d'agrégats moléculaires isolés les uns des autres, en proie à un mouvement incessant, comme les essaims de mouches qui vibrent dans un rayon de soleil, et de ce tourbillonnement s'échappaient des ondes qui se propageaient dans l'espace, portées par un milieu infiniment subtil, l'éther, qui était au plus léger des corps connus, l'hydrogène, ce que l'hydrogène lui-même est aux métaux les plus denses.

Les gaz, en particulier, apparaissaient comme formés de projectiles microscopiques, lancés dans tous les sens et bombardant sans cesse les parois du vase qui les renfermait pour rebondir sur elles et recommencer leur éternel voyage ; la chaleur contenue dans ces gaz prenait, du même coup, un sens plus précis ; elle signifiait à présent l'énergie de tous ces corpuscules en mouvement ; refroidissait-on le gaz, les vitesses des

projectiles diminuaient, les trajectoires se détendaient, puis tous les corpuscules tombaient les uns sur les autres, animés encore de mouvements tourbillonnaires : c'était la liquéfaction. Puis, à mesure qu'on leur enlevait encore de l'énergie, les molécules vibrantes prenaient des mouvements moins étendus, et le liquide diminuait de volume en se refroidissant.

Bientôt, le rapprochement des molécules leur permettait de contracter entre elles de nouveaux liens ; leurs positions relatives devenaient à peu près invariables et le liquide se solidifiait ; mais ce solide était encore animé du frisson de la vie ; on pouvait le refroidir encore, jusqu'au point où les molécules reposaient inertes les unes sur les autres : alors la matière était morte.

*
* *

Ainsi, les théories modernes avaient pour corollaire direct l'existence d'une limite inférieure du froid, mais elles ne nous disaient pas si cette limite est, en fait, accessible à nos moyens expérimentaux. Or, dans le même temps que les idées théoriques éprouvaient cette profonde transformation, l'expérience, chaque jour plus étendue et plus précise, apportait des faits nouveaux qui semblaient permettre de fixer cette limite du froid.

L'étude de la chaleur est devenue, par l'em-

ploi du thermomètre, une science véritable ; grâce à lui, les phénomènes du chaud et du froid sont accessibles à la mesure, et le degré centigrade, accepté par tous les savants, a fixé l'échelle à laquelle on rapporte tous les effets thermiques. Or, en ce qui concerne les gaz, le physicien Gay-Lussac avait, dès le début du XIX^e siècle, indiqué une de ces lois simples où il semble que la nature se livre tout entière, en montrant que, si on refroidit progressivement un gaz sous pression constante, son volume diminue d'un deux cent soixante-treizième de sa valeur à zéro degré, pour chaque degré dont s'abaisse la température. De là résulte que, si les gaz conservent toujours la même allure, leur volume sera réduit à zéro à la température de 273 degrés au-dessous de la glace fondante ; et ainsi cette température de — 273 degrés nous apparaît comme la température minima compatible avec les lois de Gay-Lussac, comme le *zéro absolu*.

D'ailleurs, d'autres considérations semblaient concorder avec celle-là pour donner la même valeur limite des basses températures : c'est ainsi que la résistance électrique des métaux diminue, à mesure qu'on les refroidit, avec une régularité telle qu'on ne peut s'empêcher de penser qu'elle doit s'annuler à cette même limite de — 273 degrés ; alors, les molécules étant en contact intime, nul obstacle ne vient plus s'opposer au

passage du courant électrique, et cette abolition prévue de la résistance devient une conséquence logique de nos idées sur la matière et la chaleur, et une présomption de plus en leur faveur.

Ainsi, s'appuyant l'une sur l'autre, de nombreuses propositions constituaient dans la science moderne un ensemble harmonieux, et l'esprit se reposait en des théories qui n'attendaient plus, et presque pour la forme, que la consécration de l'expérience. Avec le zéro absolu, il semblait que l'on eût enfin trouvé quelque chose après quoi il n'y a plus rien; l'indéfini n'existait plus, au moins dans un sens, et on touchait, pour ainsi dire, en un point, la paroi du monde.

Aussi, que de tentatives pour l'atteindre! Les efforts des voyageurs pour parvenir aux pôles de la terre en peuvent seuls donner une idée; entre tous les savants, tous les pays du monde civilisé, ç'a été une lutte presque patriotique où chacun notait la distance qui le séparait de — 273 degrés, ce pôle du froid, et s'estimait heureux d'avoir avancé de quelques degrés vers le but. Ces efforts ont rempli le XIX^e siècle: la physique y a eu ses Barentz et ses Nansen, qui s'appellent Faraday, Cailletet, Linde, Dewar; et comme les navigateurs désintéressés, en cherchant le pôle, ont ouvert en même temps des routes au commerce, tout pareillement, les découvertes du laboratoire ont frayé de nouvelles voies vers les

applications, et la science du froid a créé l'industrie du froid.



Si l'on peut diviser, un peu arbitrairement, en étapes le progrès vers les basses températures, la première d'entre elles est caractérisée par la préparation et l'emploi des mélanges réfrigérants : œuvre des artisans plutôt que des savants ; la pratique ici précède de loin toute théorie. Les anciens connaissaient les propriétés réfrigérantes d'un mélange de glace et de sel, et au xviii^e siècle on savait, par des mélanges appropriés, produire un froid suffisant pour congeler le mercure, à 40 degrés au-dessous de zéro ; de nos jours encore, on emploie couramment de semblables mixtures lorsqu'il s'agit d'obtenir de médiocres refroidissements ; en plus, nous avons la satisfaction de comprendre que leur fonctionnement n'est qu'un cas particulier de la loi naturelle qui asservit les points de fusion à rester fixes tant que solide et liquide sont en contact, et qui détermine ainsi le zéro de nos thermomètres par la constance du point de fusion de la glace. Les mélanges réfrigérants, mi-parties solides et liquides, ont un point de fusion fixe, inférieur à celui de la glace, et s'y maintiennent tant que leur masse n'est pas intégralement liquéfiée ; quant à la chaleur qu'ils

absorbent pendant leur fusion, elle n'est que l'équivalent mécanique du travail des molécules solides qui brisent leurs liens en passant à la liberté plus grande de l'état liquide.

Si les mélanges réfrigérants sont les produits de l'empirisme, en revanche, le travail systématique du laboratoire devait ouvrir, avec l'emploi des gaz liquéfiés, une voie nouvelle et féconde. Lorsque Faraday, avec une persévérance insaisissable, parvint à liquéfier la plupart des gaz connus de son temps, préoccupé uniquement de science pure, il ne voulait même pas savoir quelles applications on pourrait tirer de ses découvertes. A l'un de ses collègues, désireux de l'intéresser à ces applications, il affirmait sa volonté de travailler pour la science, et non pour les marchands de la Cité. En cela pourtant, il se trompait, car une grande industrie est née de ses découvertes, mais la science pure en a profité tout d'abord, et c'est cela qu'il cherchait uniquement.

Les gaz que Faraday liquéfiait péniblement par compression nous intéressent parce que leur évaporation permet d'obtenir des froids intenses. Si on les abandonne à l'air libre, ou mieux encore si l'on hâte leur évaporation par l'agitation mécanique, par un courant d'air ou par l'action du vide, ils se refroidissent rapidement, et refroidissent du même coup les corps mis en contact avec eux. L'effet qui se produit alors est

tout analogue à celui qu'on observe en versant sur la main quelques gouttes d'éther ou d'un autre liquide volatil ; à mesure qu'il se vaporise, la main éprouve une sensation très nette de froid. L'explication est d'ailleurs la même dans les deux cas : la transformation d'un liquide en gaz ou en vapeur représente un certain travail effectué pour libérer les particules liquides, et pour leur permettre de s'envoler librement dans l'espace environnant ; ce travail est emprunté, sous forme d'une quantité de chaleur équivalente, au liquide et aux corps voisins, dont la température s'abaisse par là-même, et il n'y a d'autre limite à ce refroidissement que la congélation du liquide restant, qui se produit quand la température est assez basse. C'est ainsi que l'acide carbonique liquide peut être, par évaporation spontanée d'une fraction de sa masse, transformé partiellement en une sorte de neige, facile à conserver malgré sa basse température ; on peut la tenir sur la paume de la main ouverte sans en être incommodé, parce quelle est mauvaise conductrice et ne touche l'épiderme que par un petit nombre de points ; elle n'en constitue pas moins un moyen puissant de réfrigération, et son mélange avec l'éther permet d'atteindre 100 degrés au-dessous de zéro.

Toutes ces opérations, autrefois longues, pénibles et possibles uniquement dans les laboratoires, sont aujourd'hui courantes et infiniment

simples. C'est que la liquéfaction des gaz est devenue une opération industrielle, qui se développe peu à peu, avec les applications de ces nouveaux liquides.

Actuellement, le chlore est liquéfié dans quatre fabriques allemandes, qui le vendent, enfermé dans des bouteilles d'acier, au prix de 75 francs les 100 kilos ; sous cette forme, il remplace avantageusement, comme désinfectant, le chlorure de chaux, et il est utilisé par nombre d'industries chimiques. Pareillement, le chlorure de méthyle, préparé par plusieurs maisons françaises, et transporté simplement dans des vases en cuivre, sert comme anesthésique et est également employé pour l'extraction des parfums contenus dans les fleurs ; enfin l'acide sulfureux liquide, utilisé dans mille industries chimiques, est livré en d'épais siphons de verre, analogues à ceux qui servent au transport de l'eau de Seltz.

Mais, de tous ces gaz, celui qui a eu la plus heureuse fortune industrielle est, sans contredit, l'acide carbonique. Préparé par combustion du coke, par décomposition de la craie, ou obtenu comme résidu de la fabrication de l'alcool dans les grandes distilleries industrielles, il est comprimé par des jeux de pompes foulantes, et liquéfié, sous une pression voisine de soixante atmosphères, dans des bouteilles en acier étiré, fabriquées sans soudures, et éprouvées à deux

cent cinquante atmosphères. Sa consommation s'est même accrue, depuis quelques années, à un tel point que les chemins de fer allemands utilisent actuellement vingt wagons-citernes qui transportent le nouveau liquide, non plus par litres, mais par mètres cubes : combien nous sommes loin du temps où M. Marcellin Berthelot, licencié ès sciences, publiait son premier travail scientifique sur la liquéfaction du gaz carbonique dans le tube capillaire d'un thermomètre ! L'acide carbonique liquide est préparé aujourd'hui en Allemagne par quarante usines, dont la production annuelle atteint 15 millions de kilogrammes, et, en France, par une douzaine d'établissements, dont la production est voisine de 6 millions de kilogrammes. Le prix de vente actuel atteint 0 fr. 50 par kilogramme, et s'abaissera encore, à mesure que la production et la concurrence se développeront davantage. Voici donc que l'industrie nous fournit, à un prix insignifiant, un liquide que les physiciens, il y a un demi-siècle, n'entrevoyaient qu'en minimes quantités ; aussi son emploi s'est généralisé, pour la conservation et le soutirage de la bière, pour la coulée sous pression des lingots d'acier, pour la mise en marche de pompes à incendie prêtes à fonctionner au premier appel, pour la champanisation du vin, enfin pour la fabrication des boissons gazeuses ; c'est sans doute par ce dernier emploi qu'il nous est le mieux connu,

et chacun a pu utiliser ces minuscules spark-lets, petites capsules en acier remplies de quelques gouttes d'acide carbonique liquide, qu'on perfore avec une pointe au sein de la boisson à champaniser, qui acquiert ainsi d'un même coup la pression et la saveur piquante du gaz carbonique.

Mais, de ces multiples applications des gaz liquéfiés, celle qui nous intéresse le plus, pour l'instant, est la production du froid ; bien entendu, les industriels se sont gardés de la négliger ; leur but, bien déterminé, n'était pas d'atteindre les froids les plus intenses, mais seulement de produire économiquement la glace, qui représente la forme pratique et transportable du ~~froid~~ ; par là, ils ont introduit dans la vie moderne un confort et une hygiène qu'ignoraient nos devanciers ; par là aussi, ils ont ouvert de nouvelles voies au commerce, en permettant le transport et la conservation des matières alimentaires. Il n'est point de ville importante qui ne possède aujourd'hui ses usines frigorifiques créées par des particuliers, par les municipalités ou, comme en Australasie, par l'État lui-même.

Peu importe, d'ailleurs, le gaz employé, ammoniac, acide sulfureux, acide carbonique. Dans son principe la machine frigorifique n'est qu'une machine à vapeur fonctionnant à l'envers : de l'eau est vaporisée et transportée de la chaudière au condenseur de la machine à vapeur

en produisant un travail mécanique, en même temps que disparaît une certaine quantité de chaleur, fournie par le foyer ; dans la machine frigorifique, au contraire, du travail mécanique est dépensé pour vaporiser un liquide qui se refroidit par-là même et congèle l'eau qui l'environne, en même temps que de la chaleur apparaît dans le condenseur où le gaz vaporisé se reforme par compression ; cette chaleur est d'ailleurs éliminée au fur et à mesure par une circulation d'eau froide. Ainsi, peut-on dire encore, les machines à vapeur utilisent une différence de température entre la chaudière et le condenseur pour produire du travail mécanique, tandis que les machines à glace dépensent du travail mécanique pour produire cette différence de température. Voilà donc ce que renfermaient en puissance les expériences de Faraday, sous leur si modeste apparence : pour les savants, la possibilité d'atteindre commodément 100 degrés au-dessous de zéro, et d'étudier les propriétés des corps à ces basses températures, et pour tous, le moyen économique de rendre la vie plus hygiénique et plus confortable.

* * *

Toutefois, après cette étape, si vaillamment parcourue, il a fallu, pendant de longues années, piétiner sur place. Ce temps, certes, n'a pas été

perdu pour la science, puisqu'il a permis de défricher plus complètement le terrain conquis par Faraday ; mais à vouloir pousser plus loin, il semblait qu'on se heurtât à un obstacle insurmontable.

Faraday avait liquéfié dix-sept gaz ; il ne les avait pas liquéfiés tous ; certains d'entre eux, et les plus communs, l'oxygène, l'azote, l'hydrogène entre autres, résistaient à tous les efforts. Natterer les avait amenés, par compression, sous deux mille atmosphères, à une densité supérieure à celle de l'eau, et pourtant ils ne s'étaient pas liquéfiés. Et peu à peu, à la suite de multiples insuccès, l'opinion s'était introduite dans la science que les gaz liquéfiables n'étaient que des vapeurs, et que les autres, au contraire, les gaz *permanents*, étaient destinés à présenter toujours, quoi qu'on pût faire, l'état gazeux. Par bonheur, une étude plus approfondie du phénomène de la liquéfaction, devait fournir le moyen d'agir sur ces gaz prétendus permanents ; le physicien Andrews montra que l'acide carbonique, si facile à liquéfier aux températures ordinaires, devenait, lui aussi, irréductible aux températures supérieures à 31 degrés : 31 degrés était sa *température critique*, celle au-dessus de laquelle il reste gazeux quoi qu'on fasse, et si le hasard n'avait point fait que les températures moyennes des laboratoires fussent inférieures à celles-là, il aurait pris place, lui aussi, au nombre des élé-

ments permanents ; l'expérience prouva, d'ailleurs, que cette propriété n'était pas spéciale à l'acide carbonique, et que chaque gaz est caractérisé par une valeur particulière de sa température critique.

Vue sous ce nouvel aspect, l'irréductibilité des gaz permanents ne paraissait plus absolue ; il s'agissait seulement d'amener chacun d'eux à une température assez basse pour que la pression pût agir et produire le changement d'état souhaité ; c'est ainsi que l'observation d'Andrews devint le point de départ de recherches nouvelles et fructueuses. Mais, dès l'origine, une difficulté se présentait ; nous pouvons en apprécier l'importance mieux encore que ne le firent, il y a trente ans, les physiciens, car nous savons aujourd'hui que l'oxygène a sa température critique à -113 degrés, l'azote à -146 degrés, et l'hydrogène à -240 degrés. C'était donc au-dessous de ces limites, si basses qu'aucun expérimentateur n'avait encore pu les atteindre, qu'il fallait, avant toutes choses, abaisser les gaz permanents pour les amener à la liquéfaction. Ainsi posée, la question n'apparaissait plus comme insoluble : c'était suffisant pour que les physiciens se missent à l'œuvre.

Un premier procédé s'indiquait de lui-même : se servir du froid produit par l'évaporation des gaz liquéfiables pour amener, progressivement et par chutes successives, la température au

point voulu. C'est l'idée dont s'inspira Raoul Pictet dans l'expérience demeurée célèbre où il liquéfia pour la première fois l'oxygène et l'azote; toutefois cette expérience, insuffisamment étudiée, prête encore aujourd'hui à trop de doutes pour qu'il ne convienne pas d'en étudier le principe sur un autre exemple, plus parfait à coup sûr, et qui, durant plusieurs années, a constitué le type des installations frigorifiques de laboratoire: je veux parler du dispositif créé à Leyde, par le professeur Kamerlingh Onnes; réalisé avec des ressources modestes, mais grâce à une ingéniosité et une patience inlassables, il permettait d'obtenir en quelques heures et d'observer à loisir, à l'état liquide, tous les gaz autrefois réputés permanents, à l'exception de l'hydrogène. Ce résultat était obtenu à l'aide d'un triple cycle d'opérations: dans le premier, un appareil frigorifique, fonctionnant au chlorure de méthyle, permet d'obtenir une première enceinte à la température fixe de 70 degrés au-dessous de zéro; la réfrigération ainsi produite est utilisée pour la liquéfaction d'un nouveau gaz, l'éthylène, qui sert à constituer le second cycle de réfrigération: on provoque, dans un récipient soigneusement capitonné, l'évaporation rapide dans le vide de l'éthylène liquide, et on réalise ainsi une nouvelle enceinte dont la température permanente atteint, et dépasse même — 140 degrés. C'est dans cet espace qu'on fait

arriver l'oxygène ou l'azote à liquéfier ; on les voit bientôt, à travers des fenêtres de verre, tomber goutte à goutte, en liquide incolore, au fond du récipient. Soumis à son tour à une évaporation rapide, l'oxygène liquéfié fournit une température voisine de 200 degrés au-dessous de zéro, température utilisée au laboratoire de Leyde pour un grand nombre d'études scientifiques.

Le dispositif que nous venons de décrire sommairement date de 1895 ; il constituait à ce moment l'installation frigorifique modèle, et tous les physiciens d'Europe et d'Amérique en rêvaient de semblables pour leur laboratoire. Et pourtant, aujourd'hui, aucun d'eux n'aurait plus la tentation de l'adopter ; peu d'années ont suffi pour transformer en un procédé démodé une installation merveilleuse d'ingéniosité. C'est assez dire que cet intervalle de temps n'a pas été perdu, et qu'il a vu plus de progrès que des siècles, autrefois, ne permettaient d'en réaliser ; mais aussi, par une triste compensation de tant le succès, l'oubli commence pour les inventeurs au lendemain de leur triomphe. Où est-il, le temps de ces vieux appareils de physique, esthétiquement contournés en objets d'art, que les générations successives contemplaient respectueusement derrière leurs vitrines ? Une fois l'an, ils en sortaient pour répéter des expériences méthodiquement réglées par les livres classiques

et les programmes officiels ; alors apparaissaient successivement, à la lumière de l'amphithéâtre, la glacière des familles, le cryophore de Wollaston, les appareils classiques à liquéfier l'acide sulfureux et l'ammoniac, et le dangereux appareil Thilorier, pour liquéfier l'acide carbonique, que le physicien ne manipulait qu'au péril de sa vie, et qui eut l'honneur d'inspirer à Emile Augier quatre actes de prose¹. La physique apparaissait alors comme faite de rites très anciens et immuables, le professeur en robe avait des allures d'officiant, et on pouvait, sans ridicule, parler du temple de la science. Aujourd'hui, tous ces vieux appareils restent, catalogués pour l'éternité, en des pièces qu'on ne visite plus, tandis que, dans la partie vivante des laboratoires, une machine de Linde fournit, sans peine et sans danger, tous les gaz liquéfiés nécessaires aux recherches modernes. Ainsi s'affirme le succès d'une méthode nouvelle de liquéfaction que vingt-cinq années de travaux ont amenée presque à la perfection.

*
* *

C'est en 1876 que notre éminent compatriote, M. Cailletet, eut la pensée d'appliquer à la liquéfaction des gaz le froid produit par leur

1. *Un beau mariage.*

brusque détente ; l'idée pouvait, au premier abord, sembler singulière : c'était par compression qu'on avait, jusque-là, liquéfié les gaz, et voilà qu'on proposait d'obtenir le même résultat en les décompressant, c'est-à-dire précisément par la méthode inverse ; mais tous les physiciens savaient de longue date que la compression brusque des gaz les chauffe, et que leur détente soudaine les refroidit ; l'antique expérience du briquet à air, par laquelle on enflamme de l'amadou au contact de l'air comprimé dans un cylindre par un piston, a servi depuis longtemps à manifester le premier de ces effets, et le second peut être observé lorsque de la vapeur sous pression s'échappe d'une chaudière : à la sortie du tuyau d'échappement, le jet est nettement transparent, comme il appartient à un gaz véritable, puis, à quelques centimètres au delà, il s'épanouit en un large panache blanc formé de fines gouttelettes liquides ; la détente brusque de la vapeur l'a donc refroidie au point d'amener un commencement visible de liquéfaction.

D'ailleurs, pour qui a une fois compris ces perpétuels échanges entre la chaleur et le travail, qui ne sont qu'un cas particulier de la conservation de l'énergie, la chose perd tout son mystère et se ramène à une explication des plus simples : lorsqu'il comprime un gaz, l'opérateur dépense une part de son énergie en luttant contre la pression que ce dernier lui oppose ; cette énergie

n'est pas perdue, et se retrouve intégralement, sous forme calorifique, dans le gaz comprimé ; et inversement, un gaz qui se détend, en repoussant devant lui les parois qui limitent son volume, effectue un travail mécanique aux dépens de sa propre énergie calorifique, et sa température s'abaisse à proportion de ce travail accompli. Supposons, par exemple, qu'un récipient contienne de l'air à la température ambiante, comprimé sous dix atmosphères ; livre-t-on brusquement passage à cet air vers l'extérieur, il s'y détend aussitôt et sa température s'abaissera instantanément de 150 degrés ; toutefois, cet énorme abaissement de température sera loin d'être permanent, et le milieu environnant aura tôt fait de restituer au gaz la chaleur qu'il avait dissipée sous forme de travail.

C'est en appliquant ce principe de la détente brusque après compression que M. Cailletet a pu, le premier en date de tous les physiciens, acquérir la certitude qu'il n'y avait pas de gaz permanents ; tous, y compris l'hydrogène, donnèrent par détente brusque un léger nuage, bientôt dissipé par le retour à la température ambiante, mais qui n'en était pas moins la preuve d'une liquéfaction commencée.

Ce procédé si original semblait pourtant porter avec lui une tare destinée à en diminuer la valeur ; il ne permettait d'observer les gaz, à peine liquéfiés, que pendant une seconde à peine ;

or il n'est de bonne observation que celle qui est faite à loisir, et les vapeurs légères obtenues par détente ne se prêtaient ni aux expériences, ni aux applications. Il est donc compréhensible que le travail des physiciens ait porté pendant de longues années sur le moyen de rendre permanent ce qui n'était encore qu'une apparence fugitive ; ces efforts ne sont pas restés stériles ; vingt années de tâtonnements et d'essais, appliqués d'abord aux gaz facilement liquéfiables comme l'ammoniac, ont abouti, avec la machine du professeur allemand Linde, à la liquéfaction industrielle de l'oxygène et de l'azote.

Entrons dans une fabrique d'air liquide, ou dans un des nombreux laboratoires qui possèdent aujourd'hui l'appareil de Linde ; nous y verrons d'abord plusieurs pompes foulantes, actionnées par un moteur électrique, et qui puisent l'air dans l'atmosphère pour, se le repassant de l'une à l'autre, élever sa pression jusqu'à deux cents atmosphères ; le gaz, refroidi par un mélange réfrigérant et soigneusement desséché, circule ensuite à travers une série de serpentins concentriques, dont chacun protège contre la chaleur ambiante celui qui est à son intérieur ; à un certain point de sa course, l'air éprouve une première détente qui abaisse sa pression à cinquante atmosphères et sa température à — 130 degrés environ ; la majeure partie de l'air ainsi refroidi revient sur ses pas et circule autour du

tube central dont elle refroidit les gaz ; une fraction seule, continuant sa route, éprouve une deuxième détente qui ramène sa pression à celle de l'atmosphère ; sa température s'abaisse suffisamment pour qu'une partie de l'air se liquéfie et s'écoule goutte à goutte dans un récipient, tandis que la fraction qui a échappé à la liquéfaction revient à son tour dans les serpentins concentriques pour former aux gaz intérieurs une chemise protectrice. Ainsi, d'une façon continue, l'air liquide s'accumule dans le récipient, soigneusement isolé, placé au bas de l'appareil liquéfacteur.

Grâce à ces dispositifs, dont aucun n'a été livré au hasard, on obtient une production abondante et économique : une machine de Linde, absorbant une puissance totale de quinze chevaux, est capable de produire huit litres d'air liquide par heure, c'est-à-dire plus d'un demi-litre par cheval et par heure ; à coup sûr, des perfectionnements sont encore possibles, puisque le rendement théorique serait six fois plus élevé ; il n'en est pas moins vrai que les liquéfacteurs de grand modèle, capables de débiter 1.000 kilos d'air liquide par jour, fournissent ce produit à moins de quinze centimes le kilogramme, et que ce prix de revient ne peut que s'abaisser en raison des développements de la nouvelle industrie. Mais il semblerait que ce développement même soit arrêté dans l'œuf par les propriétés si anormales

du nouveau produit : comment transporter, transvaser et soumettre à une série d'indispensables manipulations un liquide qui bout à 186 degrés au-dessous de zéro, et qui n'existe plus comme liquide aux températures supérieures à -110 ? Ne sera-t-on pas réduit à l'observer, à travers plusieurs couches de vitres protectrices, dans l'enceinte bien fermée qui le protège contre la chaleur ambiante ? S'il en devait être ainsi, l'air liquide ne serait susceptible d'aucune application économique, et son emploi serait limité strictement aux recherches de laboratoire.

Par bonheur, une découverte capitale, faite simultanément par Dewar en Angleterre et par le professeur d'Arsonval en France, a fait de la manipulation des gaz liquéfiés l'opération la plus aisée du monde : de tous les isolants connus, il n'en est pas de plus parfait que le vide ; un espace presque complètement vide d'air ou de tout autre gaz, tel que les machines pneumatiques modernes permettent de le réaliser, laisse bien passer les radiations des corps chauds, et la preuve en est que le filament lumineux d'une lampe à incandescence nous envoie sa lumière à travers le vide du globe qui l'entoure, mais il supprime complètement les pertes de chaleur par conductibilité, et diminue dans une proportion notable les pertes par rayonnement des corps froids ; un corps froid, maintenu dans le vide, est donc isolé au point de vue thermique.

Cette conception théorique a trouvé sa réalisation dans les vases à double paroi que livrent aujourd'hui tous les souffleurs de verre, et dans lesquels l'espace compris entre ces deux parois a été complètement purgé d'air. Qu'on verse de l'eau bouillante dans un de ces récipients ; le lendemain, elle aura encore une température de 70 degrés, et elle restera chaude plusieurs jours de suite. Cette propriété si intéressante, et pourtant si naturelle, a même suggéré de nombreuses applications ; les rites antiques de la cuisine bourgeoise seront peut-être, par elle, renouvelés, et on peut supposer qu'un jour le pot-au-feu familial ne sera plus appelé à cuire lentement sur la cendre du foyer, mais se fera, à la manière du thé, dans ces récipients isolants aussi difficiles à échauffer qu'à refroidir.

Quoi qu'il en soit, les vases à double paroi se prêtent merveilleusement à la manipulation des gaz liquéfiés. Qu'on verse dans l'un d'eux de l'air liquide, par exemple ; son contact avec la paroi, chaude encore, provoque pendant quelques secondes une vive ébullition ; mais aussitôt après, tout rentre dans l'ordre, et la masse liquéfiée, isolée du reste de l'univers par une chemise de vide, se conserve à une température inférieure de quelques degrés à son point d'ébullition ; seule, une légère évaporation par le col ouvert du récipient lui permet de compenser le minime apport de chaleur venu du dehors ; un litre d'air liquide,

placé ainsi sans précautions spéciales, n'est pas encore complètement évaporé au bout d'une semaine.

Dès lors, toutes les manipulations des gaz liquéfiés deviennent d'une extrême simplicité ; on peut les transvaser d'un récipient dans un autre et les transporter sans difficulté : de l'air liquide a pu ainsi être expédié, par chemin de fer, de Berlin à Genève, où il est parvenu sans déperdition notable. On peut aussi les filtrer ; cette dernière manipulation est d'ailleurs nécessaire pour le produit brut sorti de l'appareil de Linde ; l'acide carbonique contenu dans l'atmosphère est en effet solidifié dans l'air liquide, et trouble la liqueur ; on le retient sur le papier d'un filtre, et le liquide qui s'écoule est pleinement transparent, avec une couleur bleue qui est propre à l'oxygène ; d'ailleurs, le mélange des deux gaz de l'air ne se conserve pas en proportions fixes dans le produit liquéfié ; l'azote plus volatil s'échappe le premier, si bien que le liquide restant s'enrichit progressivement en oxygène ; d'où, pour préparer ce dernier corps, une méthode nouvelle que n'avaient pas prévue les classiques traités de chimie. Une modification très simple de l'appareil de Linde permet d'ailleurs de faire cette séparation des gaz de l'air dans l'appareil lui-même, et d'obtenir à très bas prix de l'air enrichi en oxygène au point voulu, et dont les applications industrielles seront, un jour à venir, considérables.

Ainsi, la liquéfaction de l'air est sortie des laboratoires pour entrer dans l'industrie ; elle y est de trop fraîche date pour avoir donné autre chose que des promesses, mais tout fait prévoir que nombre d'entre elles seront tenues. Déjà, on a employé l'air liquide comme anesthésique dans les hôpitaux, et comme explosif dans les mines : des mélanges d'huile minérale et d'air liquide, enflammés par une capsule de fulminate, produisent des effets analogues à ceux de la dynamite ; le nouvel explosif aurait d'ailleurs l'avantage de perdre ses propriétés au bout de quelques minutes par évaporation de l'un de ses constituants, ce qui élimine le danger des ratés et fait disparaître la possibilité du vol.

Mais c'est surtout comme force motrice que l'air liquide paraît destiné aux plus prochaines applications : deux compagnies américaines se sont déjà constituées pour cet objet, et l'une d'elles, aux derniers jours de l'Exposition universelle de 1900, exhibait un automobile marchant à l'air liquide, et capable de fournir un parcours ininterrompu de soixante-dix kilomètres à l'aide d'une provision de 45 litres de liquide, valant 7 fr. 50 ; il suffirait dès lors que l'ingéniosité des chercheurs fût secondée par le snobisme des riches pour que cet original, et en tous cas inodore, procédé de locomotion assurât à l'industrie de l'air liquide un complet essor.



Ainsi, les températures voisines de deux cents degrés au-dessous de zéro sont aujourd'hui à la portée de tous, au moins dans les grands centres scientifiques ou industriels; de tels froids suffisent, et au delà, aux besoins de l'industrie la plus perfectionnée, et il n'est pas à prévoir que l'humanité ait de longtemps, à pousser plus avant dans cette direction sa conquête économique. Mais, si l'intérêt matériel diminue à mesure qu'on se rapproche du pôle, l'intérêt scientifique grandit au contraire, et en même temps, par malheur, la difficulté. Le problème si passionnant de la réalisation des grands froids n'est plus de ceux qu'on peut espérer résoudre sans une organisation méthodique et coûteuse; chaque avancée nouvelle exige la mise en œuvre de moyens plus puissants, avec une plus forte dépense; aussi le nombre des chercheurs diminue, non pas faute d'énergie, mais par manque de ressources pécuniaires. Il en est un, pourtant, auquel ces ressources n'ont point fait défaut, et qui a su en tirer le plus merveilleux parti; c'est le professeur Dewar. Successeur de Davy et de Faraday à cette Institution royale de Londres, qui a plus fait pour la conquête des basses températures que tous les autres corps savants réunis, il a, par une intelligente interprétation des textes, bénéficié

d'une donation de cent mille dollars faite en 1895 par Thomas Hodgkins en vue de « rechercher les relations et les corrélations existant entre l'homme et son créateur » ; d'autres dons encore, la munificence de la corporation des orfèvres, ont chaque fois fourni les ressources nécessaires. Ainsi, c'est surtout par la toute-puissance de l'argent que la science anglaise a pu monopoliser l'étude des basses températures, et mériter l'admiration et la reconnaissance de tous ceux que préoccupe l'énigme de la nature et de la vie.

Déjà, dès 1893, Dewar avait réussi à congeler l'air atmosphérique par évaporation forcée du liquide ; la masse s'était prise en un solide incolore et transparent, formé en réalité d'une gelée d'azote pénétrée d'oxygène encore liquide ; on s'en rendit compte aisément en approchant de la masse un aimant, qui attira l'oxygène hors des mailles de l'azote ; l'oxygène liquéfié est en effet le plus magnétique des liquides connus, et ce n'est pas la moindre de ses singularités.

Dès 1894, Dewar s'attaquait à l'hydrogène ; entrevue seulement dans de brèves détentes, la liquéfaction de ce gaz n'avait pu être pleinement réalisée ; elle était d'ailleurs à ce point difficile, qu'il ne fallut pas moins de cinq ans pour s'en rendre maître ; enfin, le 7 juin 1899, pour le centenaire de l'association royale, le savant anglais put présenter à ses auditeurs un litre d'hydro-

gène liquide, plongé dans un bain d'air liquéfié qui le protégeait contre un refroidissement trop rapide. A voir ce corps limpide et transparent, on comprenait quelle avait été l'erreur des savants qui, sur la foi d'analogies chimiques, s'étaient toujours représenté l'hydrogène liquide comme un métal en fusion; on avait aussi la sensation du froid extrême réalisé par sa liquéfaction en enlevant le tampon d'ouate qui fermait le col du ballon dans lequel il était renfermé; condensé par une température voisine de -250 degrés, l'air ambiant se résolvait en neige, et venait obstruer le col du ballon. Ainsi, quand on manipule l'hydrogène liquide, ce n'est plus seulement de la chaleur ambiante qu'il faut se garantir, c'est encore de l'air lui-même et de tous les gaz connus, sauf l'hydrogène.

Un an ne s'était pas écoulé après la liquéfaction de l'hydrogène, qu'une nouvelle étape était franchie; le 6 avril 1900, M. Dewar présentait à l'auditoire rassemblé dans l'amphithéâtre de l'Institution royale un bloc d'hydrogène solide, semblable à de la glace parfaitement pure, transparente et très légère, fondant à -258 degrés; on était parvenu à quinze degrés du zéro absolu! Mais la fierté causée par un tel succès n'allait pas cependant sans quelque mélancolie; l'hydrogène n'est-il pas le dernier terme de la série, et sa solidification ne marque-t-elle pas la limite des expériences de refroidissement, au

delà de laquelle la science désarmée est obligée d'avouer son impuissance ?

Pourtant, un espoir subsiste, et c'est encore à la science anglaise que nous en sommes redevables ; tout le monde a entendu parler de la mémorable étude faite par Ramsay des gaz de l'atmosphère. L'humanité avait longtemps vécu sur cette idée simple, qu'avec un peu de vapeur d'eau et de gaz carbonique, l'oxygène et l'azote étaient les seuls constituants permanents de l'air. Nous savons aujourd'hui qu'il n'en est rien, et que sous le nom d'azote, on a longtemps désigné un mélange de nombreux gaz, à la fois très lourds et très difficilement liquéfiables, qui forment comme un résidu ultime dans ce résidu qu'est elle-même notre atmosphère actuelle ; gaz peu abondants, dénués d'affinités chimiques qui eussent permis, en les faisant entrer en combinaison avec d'autres corps, de les déceler et de les recueillir ; corps vraiment inertes et dont l'azote est le prototype et le chef de file : azote, argon, hélium, krypton, xénon, coronium, nébulum, d'autres peut-être encore ; aujourd'hui que nous savons distiller l'air liquide aussi aisément et mieux que nos prédécesseurs ne distillaient les liqueurs fermentées ou les pétroles, tous ces corps peuvent être extraits de l'air par des opérations méthodiques, mais d'autant plus longues, plus compliquées et plus coûteuses, qu'ils s'y trouvent en moindre proportion.

Mais ces gaz nouvellement connus existent sans doute ailleurs que dans l'atmosphère : l'hélium, qui doit son nom à ce qu'il fut reconnu premièrement dans l'atmosphère solaire, a été retrouvé dans la clévéite de Norvège et d'autres minéraux rares ; on l'a également retrouvé au nombre des produits dégagés par le radium chauffé ; de son côté, le néon fut reconnu dans les gaz dégagés des eaux minérales de King's Well, à Bath.

Un inventaire méthodique des terres et des eaux de notre globe en révélera sans doute des sources nouvelles, et plus abondantes, et peut-être qu'un demi-siècle ne sera pas écoulé avant que ces rares et mystérieux produits puissent être obtenus, non plus en traces infinitésimales, mais en quantités notables ; pour n'en pas admettre au moins la possibilité, il faudrait méconnaître toute l'histoire de la chimie, et particulièrement celle des oxydes jadis nommés terres rares, aujourd'hui assez abondamment exploités pour suffire à l'importante fabrication des manchons à incandescence.

C'est donc avec ces gaz nouvellement découverts que se fera peut-être la chimie de demain, et si la plupart de leurs propriétés nous échappent encore, nous en savons assez pour comprendre le rôle qu'ils pourront jouer dans la réalisation des basses températures : l'hélium n'a pas encore été liquéfié ; mais on sait déjà que son

point d'ébullition est inférieur d'environ 10 degrés à celui de l'hydrogène ; ainsi, du jour où on pourra l'obtenir en masses assez importantes pour en faire un agent de réfrigération, il permettra peut-être d'abaisser à 5 degrés seulement l'intervalle de température qui nous sépare encore du zéro absolu.

Et après ? dira-t-on. Après, nul ne peut dire ce qui sera, ni par quels moyens la science progressera encore vers ce pôle du froid ; tout ce qu'il est possible de prévoir, c'est qu'elle s'en rapprochera sans l'atteindre jamais, car les difficultés croissent à proportion que le terme approche, et la conquête d'un degré dans ces mystérieux parages du pôle coûte plus de labeurs que celle de 100 degrés au milieu de l'échelle des températures.

*
* *

Ainsi, ce zéro absolu de température apparaît à chaque pas fait en avant, comme un terme plus éloigné et plus inaccessible ; pourtant, à s'en rapprocher davantage, les chercheurs n'ont pas perdu leurs peines, car ils ont pu mieux comprendre et expliquer en partie quelques-uns des problèmes qui font la science si voisine de la philosophie. Nous nous contenterons, pressés par l'occasion de citer l'étude spectrale des nouveaux gaz de l'air mettant enfin sur la voie d'une

explication, attendue depuis si longtemps, du mystère des aurores boréales et des autres lueurs atmosphériques ; mais surtout, et ce sera la conclusion de cette étude, nous demanderons aux expériences de Dewar et de ses collaborateurs ce que devient, aux basses températures, le monde de la matière.

Nous avons vu, au début de ce chapitre, que certaines propriétés des corps, volume des gaz, résistance électrique des métaux, paraissaient varier avec la température suivant une loi très simple, et s'annuler à -273 degrés ; les recherches faites dans l'air ou l'hydrogène liquide ne confirment plus ces prévisions ; à ces températures très basses, la marche des phénomènes se modifie et se complique, sans que rien permette d'assigner un terme précis aux transformations de la matière : ainsi la notion du zéro absolu perd la base qu'on avait cru trouver dans des lois de nature, et avec elle s'évanouit une des idées directrices des physiciens du siècle dernier.

Une autre hypothèse, du même coup, disparaît de la science : qui n'a entendu des continuateurs de la théorie cosmogonique de Laplace, très osés et médiocrement informés, annoncer avec le refroidissement progressif des astres, le relâchement des liens qui cimentent leurs molécules ? Alors tous les corps de la nature, arrivés au terme de leur refroidissement, se désagrègeraient, se résoudraient en une poussière cosmi-

que destinée peut-être à se condenser plus tard pour former de nouveaux mondes avec les débris des mondes anciens, tout comme les êtres vivants sont faits de la cendre des morts. Pour poétique qu'elle soit, cette vision d'avenir ne peut plus, aujourd'hui être soutenue avec vraisemblance ; au contraire, plus basse est la température, et plus grande est la cohésion ; les fils métalliques placés dans l'air liquide exigent en moyenne, pour se rompre, un effort quatre ou cinq fois plus grand qu'à la température ordinaire ; une tige de plomb, soumise au même refroidissement, devient aussi élastique et aussi tenace qu'une verge d'acier. Ainsi, par le froid, les liens entre les molécules, loin de se relâcher, deviennent au contraire plus serrés et plus résistants.

D'autre part, il semble qu'en se refroidissant, la matière acquière des propriétés et des énergies nouvelles ; ainsi, la liste est assez courte des corps qui, à la température normale, possèdent la fluorescence, c'est-à-dire la propriété de transformer en énergie lumineuse d'autres énergies qu'ils absorbent, mais ce qui n'est qu'exceptionnel dans les conditions ordinaires, devient normal à deux cents degrés au-dessous de zéro ; la gélatine, la corne, la gutta-percha, émettent une lumière bleuâtre par l'action de l'effluve électrique ; le lait est très fluorescent, la glace elle-même l'est quelque peu ; plongé dans l'air

liquide, un œuf s'illumine comme un globe bleuâtre, et ces phénomènes deviennent plus sensibles encore à la température de l'hydrogène liquéfié.

Tandis que certaines propriétés de la matière semblent s'exalter par le froid, au contraire, les affinités chimiques paraissent s'éteindre, du moins celles qui éclatent, à la température ambiante, en violentes réactions ; à deux cents degrés au-dessous de zéro, tous les métaux sont pareillement inoxydables, les piles cessent de produire du courant, les acides et les bases se mélangent pacifiquement. Malgré ces exemples, il est peut-être prématuré d'affirmer que toute affinité d'ordre chimique a disparu aux basses températures ; les plaques photographiques conservent, en effet, une part notable de leur activité.

Mais il y a plus : la vie ne disparaît pas par le froid. Certes, la vie des êtres supérieurs est chose trop complexe pour résister à de grandes variations thermiques, mais il en va tout différemment de ces êtres monocellulaires, poussière de vie, auxquels on a donné le nom de microbes. Alors que la température de 100 degrés, celle de l'eau bouillante, les détruit complètement, en revanche, ces micro-organismes peuvent résister aux plus grands froids : placés une semaine entière dans l'air liquide, ou plusieurs heures dans l'hydrogène liquéfié, ils n'ont rien perdu de leur activité fonctionnelle ; des bactéries phosphores-

centes perdent leur luminosité par un refroidissement intense, mais la reconquièrent dès qu'on les ramène à la température ordinaire ; enfin, des graines refroidies à -250 degrés, ont gardé inaltéré leur pouvoir germinatif. Tout cet ensemble de faits présente pour le physiologiste un intérêt de premier ordre, et soulève des questions dont l'intérêt philosophique n'échappe à personne : on a souvent agité la question d'une transmission possible de la vie par diffusion de spores ou de germes vivants d'une planète à l'autre ; les expériences que nous venons de rapporter ne contredisent pas cette hypothèse, et on a le droit de penser, jusqu'à plus ample informé, que la vie a pu se propager de toute éternité, des mondes plus anciens aux mondes plus jeunes, et que l'unité de la matière inorganique dans l'univers a pour complément l'unité de la matière organisée.

Quoi qu'il en soit de ces hypothèses, une chose au moins résulte clairement des recherches que nous avons résumées ; et à elle seule, cette vérité acquise vaut tous les efforts qu'elle a coûtés : aux plus basses températures qu'on ait pu réaliser, la matière n'est nullement moribonde, et jamais, si loin qu'on puisse pousser dans cette voie, il ne nous sera donné de la connaître complètement inerte. Ainsi disparaît de la science une des idées favorites du xix^e siècle, que tout un ensemble d'expériences et de théories avait contribué à

mettre en faveur. Nos prédécesseurs avaient cru voir un terme dans la série des phénomènes naturels ; nous comprenons aujourd'hui quel effet de mirage faisait paraître si proche ce but qui recule indéfiniment devant nos efforts ; il n'y a pas de terme, et la chaîne des effets et des causes se prolonge indéfiniment.

MOLÉCULES, IONS, CORPUSCULES

Il n'y a pas, dans la science, d'hypothèse plus fragile que celle des atomes, et cependant, aucune n'a mieux résisté au temps, aux critiques des théoriciens, au contrôle des faits ; fille de la pensée grecque, elle a survécu à bien des chimères, et pénètre encore l'esprit moderne, pourtant si dédaigneux de l'utopie et attaché au culte des réalités ; elle imprègne à ce point toutes nos pensées qu'il est presque impossible de trouver, dans un traité de physique ou de chimie, une seule page où ne se trouvent les noms d'atome ou de molécule. On a beau la battre en brèche, et montrer son peu de solidité ; comme le roseau de la fable, elle plie et se redresse ensuite plus vivante que jamais ; il y a peu d'années, le grand chimiste allemand Ostwald prédisait, dans un manifeste demeuré célèbre, la déroute prochaine de l'atomisme, et voici qu'aujourd'hui l'expérience nous révèle tout un monde de corpuscules

qui animent l'univers et nous oblige à reprendre et à transformer, mais sans en abandonner l'essentiel, la vieille théorie de Leucippe, d'Épicure et de Lucrèce : faute de mieux, dira-t-on. Oui, certes, faute de mieux, mais voilà deux mille ans que cette théorie accompagne fidèlement la pensée humaine ; pour avoir de tels états de service, il faut bien que l'atomisme corresponde, soit à la réalité, soit aux conditions nécessaires de notre pensée.

A ce titre, et parce que des découvertes récentes lui ont donné un regain d'actualité, l'hypothèse atomique vaut d'être exposée ; nous l'examinerons du point de vue de la science et non de celui de la philosophie ; ce dernier a été trop bien mis en lumière, il y a peu d'années, par M. Hannequin¹ pour que la question puisse être reprise ; mais, sans s'occuper du fondement logique de l'idée d'atome, il est permis d'en indiquer le fondement expérimental, et de marquer le rôle que cette idée joue dans la science contemporaine. Ainsi, chacun pourra apprécier le degré de vraisemblance qu'il convient de lui attribuer ; surtout, chacun comprendra combien elle simplifie et coordonne l'exposition des faits, et c'est là, pour les savants d'aujourd'hui la question essentielle ; car de connaître la nature vraie de notre univers, personne ne croit cela

1. *Essai critique sur l'hypothèse des atomes dans la science contemporaine.*

possible pour le présent, et nous demandons aux théories d'être, non la réalité elle-même, mais des images du réel, images d'autant plus profitables qu'elles sont plus claires et mieux ordonnées. Ainsi comprise, l'hypothèse sert mieux la science que les vastes systèmes du monde et toutes les cosmogonies; elle cesse d'être une explication, mais reste une classification.

*
* *

Aussitôt que les hommes ont commencé à observer et à réfléchir, le fait que le volume des corps diminue par la compression et par le refroidissement, comme aussi le phénomène de la dissolution, ont dû leur faire penser que la matière n'était pas un plein continu; l'idée la plus naturelle eût été alors de la supposer poreuse comme le charbon de bois ou la pierre ponce; mais avant toute expérience, les cerveaux étaient préparés à d'autres idées dont l'origine n'était pas expérimentale et ainsi les physiciens se figurèrent la matière, d'après le conseil des philosophes et des mathématiciens, comme formée de molécules sans contact entre elles et maintenues par des forces attractives et répulsives. Le plus simple était d'imaginer que, dans un corps en repos, ces éléments eux-mêmes étaient immobiles, figés en place fixe par les forces de cohésion et d'affinité; on était ainsi

amené à créer une statique moléculaire, suffisante pour expliquer un certain nombre de phénomènes; c'est avec elle que la chimie classique a été faite; c'est encore à elle que Laplace et Fourier faisaient appel en créant la théorie des actions capillaires et celle de la conductibilité calorifique; des fluides en mouvement, chaleur, électricité, vivifiaient cette matière inerte et donnaient une représentation approximative de l'Univers.

Mais cette conception devait reculer peu à peu devant celle d'une matière plus vivante, introduite successivement par Bernoulli pour expliquer les propriétés des gaz, par Newton pour interpréter les phénomènes lumineux, et par Mayer pour rendre compte de l'équivalence et des transmutations réciproques de la chaleur et du travail. S'il ne reste plus grand'chose, aujourd'hui, des théories optiques de Newton, elles n'en ont pas moins contribué largement à propager la notion de corpuscules matériels en mouvement, notion qui est aujourd'hui, latente ou avouée, au fond de tous les cerveaux de physiciens. Quant aux idées de Mayer, en nous faisant considérer la chaleur comme l'équivalent du travail, c'est-à-dire comme une des formes de l'énergie, elles ont rendu nécessaire l'existence de mouvements moléculaires, qui constituent dans les corps une encaisse d'énergie sur laquelle se règlent les variations causées par les

phénomènes chimiques ou physiques. Mais on peut dire que c'est à Bernoulli que revient l'honneur d'avoir donné le premier, en 1738, une représentation un peu précise de l'hypothèse atomique : précise parce que, laissant de côté, la complication inextricable des solides et des liquides, il limitait son étude au cas, assurément plus simple, des gaz.

Pour lui, les molécules des gaz sont des projectiles en perpétuel mouvement et dont les vitesses sont assez considérables pour que leurs trajectoires soient presque rectilignes, comme le sont celles des balles lancées par nos armes modernes ; mais elles sont loin d'être aussi étendues, car, à chaque instant, des chocs viennent briser ces trajectoires : rencontres de molécules entre elles ou des molécules contre les parois qui les renvoient, comme la bande d'un billard fait rebondir la bille. Et si l'on veut donner une idée un peu nette de l'activité qui se cache sous le repos apparent du gaz, il faut citer des nombres, obtenus en précisant l'hypothèse initiale de Bernoulli. La vitesse moyenne de ces projectiles gazeux atteint 400 mètres par seconde pour l'acide carbonique, 500 pour l'azote et l'air, et 1850 pour l'hydrogène. Dans chaque centimètre cube de l'air qui nous environne, il y a quelque vingt millions de milliards de molécules, chacune d'elles ayant moins d'un millionième de millimètre de diamètre ; eu égard à leurs

dimensions, elles sont à peu près aussi serrées que le serait un millier de pinsons lâchés dans un salon de dimensions moyennes ; les rencontres entre molécules sont, par suite, tellement fréquentes que chacune d'elles, sur un parcours d'un millimètre, est dix mille fois choquée, et par suite dix mille fois détournée de sa route ; enfin, et pour en finir avec ces chiffres, si nous considérons une surface d'un centimètre carré prise sur un corps plongé dans l'air, cette surface reçoit en moyenne un milliard de milliards de chocs par seconde ; et ces chocs multipliés fournissent précisément la seule explication rationnelle de la force expansive des gaz ou de la pression qu'ils exercent contre les parois qui les enferment, car ils se combinent en une pression continue et font reculer la paroi, si elle est mobile ; et du même coup s'explique la loi fondamentale de l'élasticité gazeuse, la fameuse loi de Mariotte : si l'on vient à doubler le volume occupé par un certain nombre de molécules gazeuses, le nombre des chocs par seconde sur chaque centimètre carré de la paroi devient deux fois moindre, et par suite, la pression diminue de moitié ; cette pression varie donc en raison inverse du volume occupé par le gaz. Tout aussi simplement, les lois qui règlent la dilatation des gaz par la chaleur s'interprètent en admettant que la vitesse de translation des molécules croît avec la température suivant une progression très simple.

Si nous avons dû nous borner à esquisser dans ses grands traits ce qu'on appelle la « théorie cinétique » des gaz, nous pouvons moins encore donner une idée de la profonde incertitude qui pèse sur toutes ces spéculations. Assurément, les nombres cités tout à l'heure n'ont pas été imaginés pour les besoins de la cause ; ils sont déduits d'expériences soignées, mais par des raisonnements dont l'absence de rigueur prête à d'interminables controverses ; il y a peu d'années, à propos de ces démonstrations, une discussion peu courtoise mettait aux prises deux des hommes qui ont le mieux compris la physique mathématique et le plus contribué à ses progrès, l'autrichien Boltzmann et le célèbre académicien français Joseph Bertrand, laissant après elle l'impression que ces sortes de spéculations ne comportent guère de certitude, bien qu'elles usent abondamment de l'appareil mathématique.

*
*
*

Aussi, ne nous arrêtons pas sur ces terrains mouvants, et poussons plus avant. Bernoulli avait créé sa théorie pour expliquer la loi de Mariotte : or, la loi de Mariotte est inexacte ; elle ne s'applique en toute rigueur à aucun gaz, et, pour les gaz facilement liquéfiables ou les vapeurs, elle n'est plus qu'une grossière approxi-

mation ; il est heureux que Bernoulli ne l'ait pas su, car il aurait butté dès les premiers pas ; tout pareillement, ce fut un bonheur que Newton ait cru à la rigueur des lois de Képler, et qu'il ait ignoré les perturbations des mouvements planétaires, sans quoi il n'aurait pu trouver les lois simples de la gravitation universelle. Il est donc avantageux pour les théoriciens que la réalité ne se découvre à eux que progressivement, mais en retour, leurs théories doivent se plier aux faits nouveaux et les expliquer, sinon les prévoir ; c'est ainsi que la loi de la gravitation universelle expliqua tout naturellement les perturbations planétaires, et permit de les calculer à l'avance. Nous sommes loin, en ce qui concerne la théorie des gaz, de cette confirmation merveilleuse qui a pleinement consacré la loi de Newton ; pourtant, il s'est produit quelque chose d'analogue ; en reprenant, avec plus de précision, les raisonnements et les calculs, en tenant compte d'éléments négligés auparavant, comme les dimensions des molécules, le hollandais Van der Waals a rétabli la théorie cinétique sous une forme qui présente avec la réalité expérimentale un accord vraiment admirable ; si prévenu qu'on soit contre les hypothèses, on ne peut s'empêcher de voir dans celle-ci une représentation infiniment simple et commode des réalités, à tel point qu'il suffit de connaître un gaz à une seule température (sa température *critique*) pour que

rien ne soit plus indéterminé de toutes ses propriétés à l'état gazeux, et même une fois liquéfié; seule, la théorie cinétique, et par suite l'hypothèse moléculaire, avaient permis d'effectuer cette synthèse.

Elles n'ont pas moins éclairé d'autres phénomènes physiques, comme celui de la dissolution; aujourd'hui, quand il sucre son thé, le physicien voit en esprit les molécules constitutives du solide se désagréger et se lancer en courses folles à travers le liquide, comme le font les molécules gazeuses dans un espace vide, se choquer entre elles et contre les molécules du dissolvant, rebondir sur les parois, et cela indéfiniment: ainsi, la dissolution du solide n'est pour lui qu'une véritable gazéification; et cette manière de voir, pour invraisemblable qu'elle paraisse au premier abord, n'en a pas moins l'avantage d'établir un lien entre de nombreux phénomènes; elle permet de prévoir toutes les lois relatives à la congélation et à la vaporisation des solutions, telles qu'elles ont été trouvées expérimentalement par Raoult; elle rend compte encore des phénomènes d'*osmose*, c'est-à-dire des échanges qui se produisent spontanément lorsque des liquides différents sont séparés par une membrane. Tous ces effets sont rattachés aujourd'hui aux lois générales de la physique, et le progrès est de conséquence, car les effets osmotiques jouent un rôle essentiel dans la physiologie ani-

male et végétale ; grâce à eux, on a pu rattacher aux lois de la nature inerte l'ascension de la sève dans les vaisseaux, les échanges qui s'effectuent, de cellule à cellule entre les humeurs qui les remplissent, ainsi que les différents états d'équilibre qui se réalisent dans les tissus. Inversement, si on attache quelque crédit à une théorie appuyée sur tant de vraisemblances, on pourra s'en servir pour déterminer les propriétés des molécules dont l'existence hypothétique nous a servi de point de départ ; la théorie nous a appris et l'expérience a confirmé, que toutes les molécules jouent le même rôle dans les solutions et qu'une molécule de sucre, en se dissolvant dans un litre d'eau, abaisse autant son point de congélation ou sa tension de vapeur que ferait une molécule d'antipyrine, ou de mannite, ou de tout autre corps ; inversement, en dissolvant différents corps et comparant des températures de congélation ou des tensions de vapeur, on pourra comparer par là même les poids respectifs de leurs molécules ; on n'obtient ainsi que des indications comparatives, et nullement les poids absolus de ces masses élémentaires, mais le résultat n'en est pas moins précieux, et les chimistes utilisent couramment ces procédés, sous les noms de *tonométrie* et de *cryoscopie*, pour comparer entre eux les poids moléculaires des corps simples et composés.

Dans tout ce que nous venons de voir jus-

qu'ici, on trouve la preuve que l'hypothèse moléculaire se prête convenablement au classement méthodique des faits expérimentaux, et qu'elle n'est en conflit avec aucun; on ne trouve, et personne n'en sera surpris, aucune preuve de sa réalité; elle s'est même montrée, jusqu'à présent, impuissante à expliquer l'ensemble des propriétés des corps solides. A part quelques tentatives isolées, nous ne possédons aucune doctrine d'ensemble sur la constitution intime de ces solides; nous avons seulement des raisons de penser que leur structure est infiniment plus complexe que celle des gaz; au lieu de molécules de composition assez simple, dont l'énergie est constituée en majeure partie par des mouvements rectilignes de translation, on a tout lieu de croire que leur unité physique est un conglomerat très complexe, dont les différents éléments sont animés de mouvements compliqués, formant des trajectoires fermées sur elles-mêmes et inextricablement enlacées les unes dans les autres, se combinant encore avec une circulation incessante de la molécule elle-même dans le petit domaine qui la sépare de ses voisines; et tout cela se déforme aux moindres variations de la température, de la pression et de mille circonstances extérieures. On comprend que l'instrument mathématique, malgré sa souplesse, ait été impuissant jusqu'ici à aborder de pareils problèmes; l'hypothèse moléculaire est assez

élastique pour qu'on soit assuré que le problème n'est pas insoluble, mais il n'est pas moins certain que sa solution ne fournirait aucune preuve décisive pour ou contre la discontinuité de la matière.

* * *

Je voudrais pourtant montrer, qu'à regarder la question par une autre face, on rencontre autre chose que des probabilités et des vraisemblances : on peut acquérir la *certitude physique* que la matière n'est pas indéfiniment homogène. En effet, une substance homogène aurait les mêmes propriétés quel que fût le volume considéré ; or il n'en est rien : les propriétés des corps, et les lois qui les traduisent, établies sur un volume assez grand de ces corps, ne s'appliquent plus à un volume trop petit ; tel est le fait que quelques exemples vont mettre en lumière.

Les phénomènes qu'on appelle capillaires, tels l'ascension des liquides dans les tubes étroits, la formation des gouttes liquides, celle des bulles de savon, ont été ramenés par Laplace à une explication simple : les surfaces liquides possèdent une sorte de tension, analogue à celle d'une lame mince de caoutchouc étirée dans tous les sens ; la constance de cette tension pour un même liquide est un fait expérimental, indépendant de toute théorie, et vérifié tant qu'on opère

sur des masses appréciables de fluide ; mais vient-on à former une de ces bulles de savon dont les irisations changeantes trahissent la minceur extrême et variable, on voit se former à sa surface, au moment où elle est sur le point d'éclater, une zone obscure, mouchetée de macules encore plus sombres ; cette région, examinée attentivement, ne présente plus la surface sphérique du restant de la bulle ; l'irrégularité de sa structure prouve que la tension superficielle n'est pas constante dans l'étendue de la tache sombre, où la pellicule liquide a acquis une épaisseur légèrement inférieure à dix millièmes de millimètre : voilà donc un premier exemple d'une loi expérimentale qui cesse de s'appliquer à des éléments matériels de dimensions très réduites ; et en voici maintenant un second.

La résistance qu'un conducteur métallique offre au passage d'un courant électrique est proportionnelle à sa longueur et en raison inverse de sa section ; cette loi d'expérience, due à Pouillet, a été soumise à des vérifications nombreuses et d'une extrême précision ; elle n'est en défaut que dans un seul cas, c'est lorsqu'on a affaire à des conducteurs dont une dimension est extrêmement réduite, cas qui se présente pour les pellicules déposées sur verre dans les bains d'argenteure ; dès que l'épaisseur de ces pellicules devient inférieure à trente millièmes

de millimètre, la loi de Pouillet ne s'applique plus.

Les résultats de ce genre abondent dans la science ; j'ai eu moi-même tout récemment l'occasion de constater que le cuivre et l'argent cessent de se combiner avec l'iode dès qu'ils se présentent en pellicules d'épaisseur moindre que trente millièmes de millimètre. Tous ces faits, pris entre beaucoup d'autres, nous apprennent tous une même chose : c'est que la matière cesse d'avoir des propriétés indépendantes de son volume, c'est-à-dire cesse d'être homogène, dès qu'on en considère des parties trop petites. L'homogénéité de la matière est donc une propriété d'ensemble, qui ne subsiste plus dans ses éléments les plus petits ; en regardant de près un tas de sable, on aperçoit les grains qui le constituent ; de même, qu'on prenne un milliard de molécules d'un corps, ou qu'on en prenne deux milliards, on retrouve dans les deux groupes les mêmes propriétés, parce que ces propriétés ne sont que des moyennes, mais deux molécules du même corps n'ont sans doute, au même moment, ni même forme, ni même volume, ni même mouvement, ni peut-être même masse.

Ainsi, tous les faits d'expérience, provenant d'origines très diverses, nous prouvent qu'au dessous de trente millièmes de millimètre, à peu près, les propriétés de la matière dépendent de ses dimensions. Cela ne peut être que

si, dans ces trente millièmes de millimètre, il n'y a qu'un nombre restreint de molécules, une centaine tout au plus. Toutes les expériences conduisent donc à un même résultat, à savoir que les molécules, ou éléments discontinus des corps, doivent présenter des dimensions linéaires de l'ordre de grandeur du millième de millimètre; et les maîtres de la science moderne, comme Lord Kelvin, considèrent ce résultat non pas comme probable, mais comme pleinement acquis.

Étant données ces dimensions, on serait peut-être tenté de croire que les molécules pourront un jour être vues directement à l'aide de microscopes assez grossissants; ce serait évidemment la meilleure preuve de leur existence. Les microscopes les plus perfectionnés en usage aujourd'hui dans les laboratoires permettent de distinguer des objets dont les dimensions linéaires n'excèdent pas deux dix millièmes de millimètre; ne peut-on pas les amener à un pouvoir séparateur deux cents fois plus grand que celui-là? Cet espoir paraît, il faut bien le dire, chimérique, et il nous faut sans doute renoncer à voir ces conflits d'atomes que nous soupçonnons sans les connaître. En effet, les microscopes ne sont pas indéfiniment perfectibles, et ceux dont nos microbiologistes usent actuellement ont atteint une sensibilité qui ne pourra guère être dépassée; cela tient à la nature même de la

lumière ; quand on cherche à voir au microscope des objets de plus en plus petits, il arrive que leur image devient de moins en moins éclairée, et en même temps de moins en moins nette ; chaque point de l'objet donne une image complexe formée de plusieurs cercles concentriques, et pour chercher à trop bien voir, on ne distingue plus rien. Il faut penser de plus que les molécules ne sont pas, selon toute vraisemblance, immobiles, mais animées de mouvements incessants avec des vitesses pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres par seconde ; fussent-elles mêmes de dimensions suffisantes pour être distinguées au repos, on ne les verrait pas plus que l'œil ne distingue au passage la balle d'un fusil.

Pourtant, au moment même où nous désespérons de jamais voir de nos yeux les molécules, il semble qu'un curieux phénomène nous les montre presque : c'est le *mouvement brownien*, ainsi nommé d'après le naturaliste anglais Brown, qui l'a, le premier, observé et décrit.

Quand on regarde avec un microscope de fort grossissement une goutte d'un liquide impur, tout paraît mouvement et vie dans cette masse qu'on aurait pu croire tranquille et inerte ; des millions de corpuscules s'y agitent en tous sens ; les uns sont nettement organisés ; d'autres, trop petits pour qu'on puisse distinguer en eux des caractères d'organisation, appartiennent au monde mystérieux des microbes. Si, dans le

liquide, on introduit une base ou un acide énergique, ou encore un poison comme le cyanure de potassium, tout ce qui a vie s'arrête, se résorbe et disparaît. Mais le mouvement ne s'arrête pas pour cela ; de nombreuses particules continuent à s'agiter ; cette agitation s'exalte par la chaleur, bien loin de s'arrêter vers 100 degrés comme celle qui est due aux êtres vivants ; elle se produit aussi bien dans les milieux les plus impropres à la vie ; on a pu d'ailleurs l'observer dans des conditions qui prêtent moins encore au doute, s'il est possible : dans l'intérieur de certains cristaux de quartz, il existe de petites cavités, ayant la forme d'un cristal en creux, et remplies d'eau ou d'acide carbonique liquide ; souvent, une minuscule bulle d'air se trouve au sein du liquide, et on la voit au microscope, animée elle aussi de mouvements incessants. Notons encore que les déplacements des êtres organisés paraissent dirigés vers un but, tandis que le mouvement brownien est essentiellement livré au hasard ; il est fait d'une succession de déplacements brusques, se produisant à intervalles irréguliers, dans toutes les directions et avec une amplitude d'autant plus grande que le corpuscule considéré est plus petit ; et ce phénomène se manifeste indéfiniment ; on l'a observé, sur une même préparation, pendant des années sans trace d'affaiblissement.

Quelle peut être, d'après cela, l'origine du

mouvement brownien ? On a cherché de tous côtés, on a mis en cause la pesanteur, la chaleur, la lumière, les actions capillaires ; aucune des explications proposées n'est satisfaisante. Et alors, il faut bien finir par penser que le mouvement brownien est une manifestation de l'activité moléculaire, et que les molécules jouent à la balle avec les grains de matière inerte placés dans le champ de leurs vibrations ; elles les poussent, les bousculent, se les renvoient de l'une à l'autre, et plus la balle est lourde moins elle obéit aux chocs qu'elle reçoit. Certes, ce n'est là qu'une supposition, mais comment ne pas voir qu'elle s'allie avec ce que nous savons déjà pour faire de l'hypothèse atomique autre chose qu'un concept de l'esprit et un jeu de philosophes ?

*
* .

La molécule n'est pas sans doute le terme ultime de divisibilité de la matière. Si, dans certains corps comme la vapeur de mercure et les gaz nouvellement découverts de l'atmosphère, argon, hélium, néon, etc., elle paraît constituée d'une masse unique, le cas est très exceptionnel ; pour les autres corps, certains phénomènes physiques, comme la propagation du son ne s'expliquent bien, qu'en supposant leurs molécules constituées d'éléments séparés les uns des

autres et animés de mouvements distincts ; ces éléments sont les atomes. Mais si la notion d'atome est utile en physique, elle n'y avait pas joué jusqu'ici un rôle essentiel ; aussi les physiiciens l'avaient-ils quelque peu négligée jusqu'à ces dernières années, où les découvertes dont nous parlerons tout à l'heure, ont permis de pousser plus loin l'anatomie de la molécule.

L'atome apparaît, au contraire, comme une notion indispensable aux chimistes, s'ils admettent, comme ils le font depuis Lavoisier, que les corps simples élémentaires subsistent effectivement dans les combinaisons ; alors la molécule d'eau, par exemple, devra contenir de l'hydrogène et de l'oxygène ; elle sera construite avec les atomes de ces corps simples.

En conséquence de cette manière de voir, l'effort des théoriciens de la chimie a tendu jusqu'ici vers ce but unique : construire avec les atomes des corps simples les édifices moléculaires des différents corps composés. Ces édifices, ils se les sont représentés rigides, et ils aiment à les figurer au moyen de boules de différentes couleurs, maintenues par des armatures en fil de fer ; tâche peut-être un peu étroite, mais pourtant, combien utile ! De ces figurations, ils ont fini par faire une science véritable, la *stéréochimie*, qui permet de prévoir le nombre des composés qu'on pourra tirer de tels corps simples, leurs modes de préparation, leurs réactions

et jusqu'à leurs propriétés physiques les plus délicates, comme la couleur ou le pouvoir rotatoire. Tout cela, au point de vue pratique, est de grande conséquence. D'ailleurs, le souvenir des rêves et des utopies de l'alchimie a écarté les chimistes des spéculations de pure théorie, et l'esprit de Lavoisier planait sur eux. En se maintenant résolument sur le terrain des faits, en restant avant tout utilitaires, ils ont constitué la plus utile, peut-être, de toutes les sciences, en tous cas une de celles qui ont modifié le plus profondément les conditions de la vie ; nul ne songera à les en blâmer, mais on peut bien constater qu'ils se sont servis de l'hypothèse atomique, mais qu'ils ne l'ont pas servie. Aujourd'hui pourtant, des chimistes éminents commencent à penser et à proclamer qu'il faut laisser entre les mains des ingénieurs, des spécialistes, la partie industrielle de la chimie, et que le rôle des véritables hommes de science est de se pencher plus près sur la nature, pour essayer de voir par le dedans, et non pas seulement du dehors, cette chose mystérieuse qu'on appelle une réaction chimique ; ils ont dit, en un mot, qu'après avoir fait l'anatomie de la molécule, il restait à en pénétrer la physiologie.

Ainsi, malgré d'immenses lacunes, l'hypothèse atomique s'est précisée peu à peu avec les progrès de l'expérience ; elle a fait corps avec elle, comme le ciment avec les pierres d'un édi-

fice, à tel point qu'il nous est devenu aujourd'hui difficile de nous figurer la matière autrement que composée d'atomes, associés en molécules. Bien des choses encore nous étonnent et nous déroutent, mais tant d'autres en revanche sont classées qu'on ne peut se défendre, en considérant le bloc des faits réunis par cette théorie, d'espérer que l'univers entier viendra un jour s'y agréger. Mais voici que la science, qui ne s'arrête jamais, ouvre aux chimistes, comme aux physiciens, des chemins nouveaux, et leur présente des systèmes matériels d'un type inconnu qui va les obliger à briser et à élargir les cadres de leurs hypothèses.

Ainsi, le renouveau qui se manifeste depuis dix ans dans les sciences n'est pas sans troubler profondément des idées théoriques qu'on pouvait croire acquises à jamais ; mais cela même est un bonheur. Les époques où les théories paraissent le plus fermement assises, où elles prennent l'allure dogmatique de religions, sont des époques d'arrêt et de léthargie scientifique ; les jours heureux sont ceux où la puissance des faits renverse la vérité de la veille, pour y substituer des idées plus compréhensives ; périodes de tâtonnement et de doute, mais aussi périodes de véritable progrès.

Aussi, ceux qui, il y a vingt ans, escomptaient un développement tranquille et méthodique des idées acquises de leur temps, peuvent aujourd'hui

d'hui confesser leur erreur ; la révolution bat son plein ; il ne s'agit plus d'aménager intérieurement l'édifice de nos hypothèses moléculaires ; c'est l'édifice lui-même qui est à rebâtir presque en entier, et sur un plan dont nous ne connaissons encore que quelques lignes. Exposons pourtant les idées générales que la hâte des débuts a permis de rassembler.

* * *

Une première catégorie de faits a été fournie par l'étude des solutions salines. Nous avons vu ce qu'était, dans les idées modernes, une solution de sucre dans l'eau ; on pourrait croire qu'il en va tout pareillement d'une solution aqueuse de sulfate de cuivre, ou de sel marin ; or l'expérience nous répond négativement. Prenez dix molécules de sucre, et dissolvez-les dans autant d'eau que vous voudrez, il n'y aura toujours que dix molécules distinctes, parcourant le volume de la solution. Mais agissez de même avec dix molécules de sulfate de cuivre ; pour une médiocre concentration, vous trouverez quinze molécules distinctes, pour une dilution plus grande, il y en aura dix-sept, dix-huit, dix-neuf, et enfin, aux dilutions extrêmes, les dix molécules de vitriol auront donné vingt molécules distinctes, errant dans la liqueur. Qu'est-ce à dire, sinon que, parmi les molécules de sulfate

de cuivre, un certain nombre se sont coupées en deux, que le nombre de ces molécules *dissociées* croît avec la proportion du dissolvant, et qu'aux dilutions extrêmes, la dissociation est intégrale? Tel est le phénomène qu'on a appelé *dissociation des ions*, en désignant par « ions » ces fragments des molécules brisées. Or les ions ne sont pas toujours des individualités chimiques cataloguées par la science : pour la molécule de sulfate de cuivre, composée d'un atome de soufre, quatre d'oxygène et un de cuivre, et dont la formule chimique est par suite SO_4Cu , l'un des ions est du cuivre Cu , mais l'autre, SO_4 , est un corps innommé dans les classifications chimiques ; et pourtant il existe, et des centaines d'autres avec lui, et si la chimie d'hier n'a pas eu à compter avec eux, il faudra bien que celle de demain s'en préoccupe.

Ainsi, et c'est déjà un premier point acquis, l'expérience nous a appris l'existence de groupements moléculaires inconnus auparavant, et qui font éclater les cadres des vieilles classifications ; cette première acquisition n'a pas été inutile, car elle a permis de voir clair dans un phénomène connu depuis plus d'un siècle, je veux dire l'électrolyse, c'est-à-dire la décomposition d'un corps par le courant électrique. L'expérience nous apprend, en effet, que tous les corps qui se dissocient par la dissolution en ions séparés, sont électrolysables ; les autres, comme le sucre

que nous avons pris pour exemple, refusent de laisser passer le courant électrique, et par suite ne peuvent être électrolysés. Une pareille coïncidence, vérifiée sur des milliers d'exemples, ne peut être l'effet du hasard ; c'est en cherchant à l'expliquer qu'on a trouvé le mécanisme très probable des décompositions électrolytiques. Il a fallu, à cet effet, rajeunir les idées, qu'on aurait pu croire singulièrement démodées, de Berzélius et de Coulomb, et admettre qu'une molécule, neutre au point de vue électrique, est formée de la juxtaposition de deux ions portant des charges égales d'électricités contraires ; les ions rendus libres par la dissolution errent au hasard, et par conséquent restent répandus uniformément dans la liqueur ; mais vient-on à plonger dans celle-ci deux lames métalliques reliées aux deux pôles d'une pile, alors les phénomènes changent : la lame reliée au pôle négatif, celle qu'on appelle la *cathode*, attire à elle les ions chargés positivement, ce sont généralement les ions métalliques ; inversement, l'autre lame, nommée *anode*, reliée au pôle positif, attire les ions négatifs ; alors, au lieu d'errer à l'aventure, les deux systèmes d'ions cheminent en sens inverses ; les uns vont sur la cathode apporter leurs atomes métalliques et leurs charges électriques positives ; les autres aboutissent pareillement sur l'anode où ils sont libérés, et ainsi s'explique le double transport de

matière et d'électricité qui constitue l'électrolyse.

Il faudrait pousser cette explication plus avant pour montrer combien elle s'adapte à tous les détails de l'expérience ; mais, à défaut d'une conviction raisonnée sur ce point, le lecteur aura du moins pénétré le mécanisme de certains phénomènes que nous allons retrouver sous une forme nouvelle ; historiquement et logiquement, c'est un premier jalon dans l'établissement des doctrines modernes.



Le travail des laboratoires a été souvent comparé à celui des mineurs qui, du pic et de la pioche, agrandissent peu à peu leur domaine ; parfois un coup bien frappé, et au bon endroit, traverse une paroi, et par l'ouverture on aperçoit une grotte toute pleine de merveilles. Röntgen a eu, en 1895, pareille fortune. Depuis, des centaines d'ouvriers travaillent sans relâche à agrandir cette étroite lumière ; la roche est dure, la grotte merveilleuse est encore inaccessible, mais on la voit pourtant un peu mieux ; essayons d'y regarder.

Prenons, pour cela, l'ampoule radiographique dont Röntgen a fait usage. Dans cette ampoule close, le vide est poussé jusqu'aux plus extrêmes limites ; deux lames de platine, reliées aux deux

pôles d'une bobine de Ruhmkorff, pénètrent à l'intérieur, et forment l'anode et la cathode entre lesquelles s'écoule le flux électrique; de la cathode s'échappent alors normalement des radiations, appelées *rayons cathodiques*, qui traversent l'ampoule et vont frapper sa paroi de verre, en y produisant une fluorescence verdâtre caractéristique. De ces points de la paroi émane à son tour la radiation mystérieuse découverte par Röntgen : Ainsi, le choc des rayons cathodiques contre l'ampoule excite les rayons X comme le choc du marteau contre le timbre provoque les vibrations sonores.

Nous allons maintenant réaliser avec ces rayons X une expérience fondamentale ; faisons-les passer à travers un gaz quelconque, l'hydrogène par exemple. Ce gaz, jusque-là parfaitement isolant, deviendra aussitôt conducteur de l'électricité ; entre deux plateaux métalliques parallèles, plongés dans ce gaz et reliés aux deux pôles d'une pile, il s'établira par suite un courant électrique qui traversera le gaz modifié par les rayons X et devenu, grâce à cette modification, conducteur. Or, cette conductibilité électrique provoquée dans l'hydrogène se présente avec des caractères singuliers ; elle se maintient quelques minutes après que l'émission des rayons X a cessé, si bien que l'hydrogène ainsi modifié peut être transvasé d'un récipient dans un autre sans avoir encore perdu sa conductibilité.

Un semblable effet ne peut que suggérer une explication analogue à celle que nous avons trouvée pour l'électrolyse du sulfate de cuivre, et nous porte, par suite, à imaginer une véritable « ionisation », une dissociation en ions des molécules neutres de gaz; sous l'action des radiations X, et par un mécanisme que nous pourrions bientôt préciser, la molécule gazeuse se brise en deux fragments, en deux ions, possédant des charges électriques égales et contraires. Vient-on à supprimer l'action séparatrice, en supprimant l'influence des rayons X, les ions disjoints se retrouvent peu à peu au cours de leurs pérégrinations, et se recombinent deux à deux, ramenant le gaz à son état initial; mais si auparavant on a fait passer le gaz entre deux plateaux reliés aux pôles d'une pile, les ions positifs chemineront vers le plateau relié au pôle négatif, qui joue le rôle de cathode, les ions négatifs seront entraînés en sens inverse avec leurs charges électriques; ainsi, tout comme dans l'électrolyse, ces particules matérielles assurent un double transport d'électricité entre les deux plateaux, et c'est le phénomène que nous constatons en disant que le gaz est devenu conducteur.

Cette hypothèse, bien que suggérée par les faits, ne serait qu'une œuvre d'imagination sans portée scientifique, si de nombreuses expériences, de nombreuses mesures ne venaient lui

apporter un sérieux crédit. Or, précisément, ces ions hypothétiques peuvent être étudiés de très près : on peut d'abord mesurer leur vitesse de propagation entre les plateaux métalliques par un procédé qu'une comparaison va rendre aisé à comprendre ; imaginons une barque qui traverse un fleuve d'une rive à l'autre ; la force du courant lui imprimera une certaine dérive, si bien qu'elle n'accostera pas en face du point de départ ; si nous connaissons la largeur du fleuve, la vitesse de son courant et la grandeur de cette dérive, nous en pourrons déduire, par un calcul très simple, la vitesse propre de la barque. Or, les ions qui cheminent de l'un à l'autre plateau sont semblables à cette barque ; si on établit entre ces deux plateaux un courant gazeux de vitesse connue, leurs chemins seront obliques, et la connaissance de cette obliquité, facile à mesurer, fera connaître les vitesses propres des ions.

On peut encore mesurer le nombre des ions existant dans un certain volume de gaz, en profitant d'une propriété curieuse découverte par Helmholtz et Lenard : supposons que, dans un espace légèrement sursaturé de vapeur d'eau, on produise des ions par l'action des rayons X ou par l'un quelconque des moyens que nous indiquerons tout à l'heure. La vapeur, jusque-là aussi transparente qu'un gaz, se condensera aussitôt, dans toutes les régions ionisées, sous

forme de minuscules gouttelettes qui forment dans ces régions un nuage opalin ; autant d'ions, autant de gouttelettes ; chacun d'eux a formé comme un germe autour duquel la vapeur, en état gazeux instable, est venue se condenser et s'agglomérer. Or, par des expériences d'une précision assez grande, on peut supputer le nombre de ces gouttelettes ; ce sera aussi le nombre des ions.

Connaissant ce nombre, on connaît également la charge électrique emportée par chacun d'eux, puisque la mesure de la conductibilité électrique du gaz détermine la charge transportée par l'ensemble des ions. Enfin, on peut prendre une idée de l'ordre de grandeur de ces ions en étudiant la vitesse avec laquelle ils se diffusent, en dehors de toute attraction électrique, dans le gaz ambiant ; comme toutes les molécules gazeuses connues, ils progresseront d'autant moins vite qu'ils seront plus gros. Ainsi, nous apercevons tout un programme d'expériences, qui vont permettre de préciser l'hypothèse prise comme point de départ ; et ce qu'il convient encore d'ajouter, c'est que pour mesurer toutes ces grandeurs, nous disposons en général de plusieurs méthodes entièrement distinctes, et que ces méthodes, se contrôlant l'une l'autre, donnent des résultats concordants.

Il ne nous reste plus qu'à voir quelle figure va prendre, d'après toutes ces déterminations,

notre hypothèse initiale. Tout d'abord, nous constatons qu'à rebours de ce qui a lieu dans l'électrolyse des sels dissous, le nombre des ions formés n'est qu'une fraction très petite de celui des molécules intactes : même quand les rayons X ont produit leur effet maximum, il n'y a guère plus d'un ion formé pour un milliard de molécules neutres, ce qui en représente encore quelque vingt millions par centimètre cube, dans un gaz aux conditions normales. Les charges électriques des ions sont médiocres, et par suite, lorsqu'ils sont placés entre les deux plateaux électrisés dont nous parlions tout à l'heure, les attractions et répulsions électriques qui les font progresser sont faibles ; mais, en revanche, ces ions ont des masses matérielles considérables, plus grandes pour les ions positifs que pour les négatifs, et de l'ordre d'une dizaine de molécules. Ainsi, de faibles forces ont à ébranler de lourdes masses, et c'est pourquoi les ions progressent lentement ; ils font à peine quelques centimètres à la seconde ; ils constituent donc la « petite vitesse » dans les transports intermoléculaires.

Ainsi, nous sommes amenés à concevoir un nouvel état d'agrégation de la matière, entièrement distinct de ceux que nous connaissions ; nous sommes en présence de molécules que les théories classiques de la chimie ne nous permettent pas de représenter, car de simples

agglomérations d'atomes seraient loin de posséder les propriétés électriques et mécaniques des ions positifs et négatifs. D'ailleurs, les affinités chimiques ordinaires ne paraissent jouer aucun rôle dans l'ionisation : qu'on soumette à l'action des rayons X un mélange d'hydrogène et de chlore, ou bien l'acide chlorhydrique qui résulte de la combinaison de ces deux gaz, le résultat sera exactement le même ; il n'y a donc aucune comparaison à établir entre l'ionisation par les rayons X et certaines réactions chimiques produites par la lumière ; entre ces deux phénomènes, l'analogie paraît, au moins jusqu'à nouvel ordre, purement superficielle.

Mais si nous avons établi que l'ion constitue dans la science une notion nouvelle, il nous reste à montrer que ces ions, loin d'être l'exception dans la nature, forment au contraire un type très général et très répandu.

*,

En 1896, peu de temps après la découverte de Röntgen, M. Becquerel constata que le sulfate double d'uranium et de potassium émettait, comme l'ampoule radioscopique, des radiations capables de traverser le papier noir, le bois, les lames métalliques minces, et d'impressionner une plaque photographique. Ces radiations,

nommées depuis rayons Becquerel, étaient également capables de rendre conducteurs les gaz traversés par elles, et cela par un processus très analogue à celui que nous avons constaté à propos des rayons X ; c'était encore un phénomène d'ionisation provoqué d'une façon spontanée et indéfinie par le sulfate double en question. M. Becquerel reconnut bientôt après que cette propriété ionisante était commune à tous les sels d'uranium, et que l'uranium métallique la possédait à un degré plus élevé que ses sels ; c'est donc une propriété atomique, c'est-à-dire liée à l'atome d'uranium et qui se retrouve dans toutes ses combinaisons.

Il eût été extraordinaire que l'uranium fût le seul corps simple à jouir de cette propriété. En 1898, M^{me} Curie observa qu'un autre métal, le thorium, se comportait d'une manière analogue ; mais, en outre, elle trouvait dans la nature des minéraux possédant l'activité ionisante à un plus haut degré que l'uranium et le thorium ; cette remarque ne pouvait que suggérer la présence dans ces minéraux d'un élément, encore inconnu, et plus actif que les corps précédents. M. et M^{me} Curie, ayant pris le plus ionisant des échantillons essayés, la pechblende de Joachimstahl, en retirèrent un corps, chimiquement identique au bismuth, et auquel ils donnèrent le nom de polonium ; puis, peu après, un métal voisin du baryum, qui

fut appelé radium; enfin, M. Debierne annonçait en 1900 la découverte d'un autre élément, l'actinium, doué des mêmes propriétés. De tous ces corps, qu'on nomme radioactifs, le radium est actuellement le mieux défini; son activité dépasse cent mille fois celle de l'uranium; aussi se manifeste-t-elle avec une vigueur inattendue. Maintenus indéfiniment dans l'obscurité, les sels de radium n'en restent pas moins lumineux, et déversent sur le monde extérieur, non seulement la lumière, mais encore la chaleur; M. Curie possède un échantillon de radium qui, depuis de longs mois, cède ainsi à l'extérieur cent calories par gramme et par heure, c'est-à-dire assez de chaleur pour fondre, toutes les heures, son propre poids de glace; pour expliquer l'énorme radiation du soleil, il suffirait d'admettre que cet astre renferme quatre grammes de radium par mètre cube. Non content d'ioniser, d'éclairer et de chauffer l'espace ambiant, ce radium provoque autour de lui cent réactions chimiques; il impressionne les plaques photographiques, transforme l'oxygène en ozone, le phosphore blanc en phosphore rouge, attaque profondément les tissus vivants, et altère jusqu'au récipient en verre qui le contient. Enfin, il rend, pour un temps, radio-actifs comme lui-même les corps avec lesquels il se trouve en contact, si bien que la fiole qui l'a contenu peut à son tour, et pendant de longues heures,

ioniser l'espace autour d'elle. Ainsi le radium répand à profusion autour de lui toutes les formes de l'énergie, sans paraître en emprunter aucune au monde extérieur ; il donne sans recevoir, et sans paraître s'appauvrir.

Cet ensemble de propriétés plus extraordinaires les unes que les autres a fait de la découverte du radium l'événement scientifique le plus important depuis la découverte des rayons X ; mais il ne faut pas oublier que les corps radioactifs nous présentent, comme en un verre grossissant, une propriété commune à beaucoup d'autres ; elle a été constatée jusque dans les gouttes de pluie, la neige fraîchement tombée et le feuillage des plantes. Enfin, parmi les radiations émises par le soleil, il en est qui accomplissent encore la même fonction ionisante ; ce sont des radiations invisibles, et qu'on appelle ultra-violettes parce que, dans le classement des diverses radiations séparées par le prisme, elles prennent place au delà du violet. On comprend maintenant que les ions n'ont pas attendu Röntgen pour exister dans la nature ; il y a beau temps que les rayons solaires, d'un côté, et l'action des substances actives contenues dans le sol, d'autre part, en ont peuplé l'univers, et ce sera certainement un problème de haut intérêt que de déterminer le rôle qu'ils y jouent. Il est, dès à présent, vraisemblable qu'ils sont un des facteurs les plus importants dans la forma-

tion de la pluie et dans la distribution de l'électricité terrestre et atmosphérique.

* * *

L'ionisation des gaz, après celle des électrolytes, nous a appris l'existence de groupements moléculaires distincts de ceux auxquels la physique et la chimie classique nous avaient conduits ; mais nous ne sommes pas au bout de nos découvertes ; l'étude des rayons cathodiques nous en réserve une du plus haut intérêt. Nous avons nommé, sans insister, cette radiation qui, dans l'ampoule radiographique, se détache normalement de la cathode pour aller se briser sur la paroi de verre dont elle provoque la fluorescence ; il faut maintenant y revenir, pour essayer d'en découvrir la véritable nature.

Les rayons cathodiques diffèrent des rayons X par une propriété fondamentale : ils sont déviables par l'aimant et par les corps électrisés : qu'on approche un aimant de l'ampoule de Röntgen, et on verra se déplacer sur le verre la tache verdâtre qui marque l'aboutissement des rayons cathodiques. La présence de masses électrisées dans le voisinage produirait un effet analogue ; or, cette double propriété est caractéristique de charges électriques en mouvement, emportées bien entendu par un support matériel, car on n'a jamais rencontré jusqu'ici l'électricité indé-

pendamment d'un pareil support ; nous sommes donc amenés à penser que les rayons cathodiques sont constitués par un flux de matière électrisée, émané de la cathode ; on peut aisément déterminer la nature de sa charge électrique en la recueillant sur un conducteur métallique ; on constate qu'elle est toujours négative. D'autre part, que sont ces particules matérielles émanées de la cathode ? Allons-nous encore retrouver des ions, ou quelque chose d'analogue ? Si nous avons pu le penser, l'expérience ne tarderait pas à nous détromper ; on peut en effet apprécier la masse de chacune de ces particules ; elle est environ la *deux millième partie* de la masse d'un atome d'hydrogène ; on peut encore mesurer la vitesse avec laquelle elles se propagent à partir de la cathode : cette vitesse peut atteindre et dépasser *cent mille kilomètres par seconde*, le tiers de la vitesse de la lumière. Donc, ni par la masse, ni par la vitesse, ces particules ne ressemblent aux ions. J. J. Thomson leur a donné le nom de « corpuscules » ; les corpuscules diffèrent des ions autant qu'on peut l'imaginer ; ils réalisent la « grande vitesse » dans les transports intermoléculaires ; la charge électrique qu'ils emportent avec eux est égale à celle de l'ion, mais leur masse matérielle réduite leur permet d'atteindre les vitesses considérables que nous venons d'indiquer.

Les cathodes des tubes à rayon X ne sont pas

seules à projeter des corpuscules dans l'espace ; les sels d'uranium, de radium, et en général tous les corps radio-actifs, émettent des radiations complexes dans lesquelles on retrouve ces corpuscules, en plus de rayons analogues à ceux de Röntgen et qui, probablement, sont constitués comme eux par des ondes de l'éther. Une expérience récente, due à sir W. Crookes, permet de saisir, en quelque sorte sur le fait, la projection de ces corpuscules, et donne par suite de leur existence un témoignage saisissant : qu'on approche un grain de radium à quelques millimètres d'un écran fluorescent ; en regardant à la loupe la région de cet écran voisine du radium, on la verra s'illuminer de points brillants qui ne font qu'apparaître et disparaître, jamais aux mêmes places, et qui scintillent comme des étoiles dans le ciel ; en chacun de ces points brillants, nous voyons la marque du bombardement des corpuscules qui, projetés par le radium, excitent par leur choc la fluorescence de l'écran ; si donc les petites dimensions et la grande vitesse de ces corpuscules nous empêchent de les voir directement, au moins nous voyons l'effet de leur choc, c'est-à-dire les ondes lumineuses qui émanent du point frappé : tout pareillement, quand des gouttes de pluie tombent dans l'eau d'un lac, nous ne voyons pas chacune d'elles individuellement, mais nous sommes avertis de leur existence par les ronds qu'elles produisent à la surface.

L'émission de corpuscules par les corps radio-actifs, étant un fait acquis, doit emporter comme conséquence une diminution progressive du poids de ces corps qui projettent leur propre substance; pourtant, telle est la petitesse de ces particules, que cette diminution de poids est inaccessible à l'expérience; d'après M. Curie, le radium le plus actif perdrait un millième de sa substance dans un million d'années; d'autres physiciens, il est vrai, indiquent des vitesses de déperdition dix mille fois plus grandes que celle-là, si bien qu'il ne faut jusqu'à présent accepter qu'avec réserve les évaluations de cette sorte.

Bien loin d'être une exception dans la nature, cette émission de corpuscules semble être un phénomène très général; on a pu la constater autour d'un filament de carbone incandescent, et il est vraisemblable que tous les corps possèdent, à haute température, la même propriété; enfin, les radiations ultra-violettes, quand elles viennent frapper un métal quelconque, en détachent des corpuscules qui se meuvent avec une vitesse voisine de mille kilomètres à la seconde, très inférieure par suite à celle des corpuscules émis par les cathodes ou les corps radio-actifs.

L'univers entier nous apparaît donc comme peuplé de corpuscules, lancés avec des vitesses variables, mais toujours très grandes, et entraînant avec eux dans l'espace leurs charges d'électricité négative, toutes égales entre elles. A la

vitesse près, tous ces corpuscules paraissent identiques entre eux ; quelle que soit leur origine, ils semblent n'être faits que d'une seule espèce de matière ; ainsi, et pour la première fois, nous sommes amenés à croire que l'atome n'est pas aussi insécable que son nom semble l'indiquer ; là où les actions chimiques les plus énergiques ont échoué, la chaleur seule, ou encore quelques vagues de l'éther venant frapper les corps, suffisent à en détacher cette poussière d'atome, qui paraît même se former spontanément aux dépens des substances radioactives ; et comme le corpuscule présente toujours les mêmes propriétés, on peut se demander si nous n'avons pas atteint avec lui le substratum du monde matériel, l'élément définitif à l'aide duquel on peut édifier atomes et molécules.

*
* *

Cette pensée ne cesse de hanter l'esprit des physiciens, et surtout des savants anglais, qu'une sorte de hardiesse native a toujours poussés vers les théories les plus audacieuses. Aussi, dès que sir W. Crookes eut, le premier, obtenu les rayons cathodiques et manifesté quelques-unes de leurs singularités, il n'hésita pas à annoncer l'existence, dans les tubes à gaz raréfiés, d'un quatrième état de la matière, nommé par lui « état radiant », et aussi éloigné de l'état

gazeux que les gaz le sont eux-mêmes des liquides et des solides. Accueillie, en France, avec une certaine réserve, cette idée s'est développée par l'effort continu de Rutherford, de J. J. Thompson, de Lodge, à la fois expérimentateurs habiles et profonds penseurs; et aujourd'hui qu'elle s'est clarifiée, précisée et qu'elle nous permet de prendre une idée du mécanisme intime de l'univers, il faut bien que nous l'écou-tions d'une oreille plus attentive, sans oublier qu'elle n'est encore qu'une construction de fortune.

Nous acceptons l'existence d'une matière dis-continue, plongée dans un milieu infiniment moins dense, qui existe sans solution de conti-nuité dans tout l'univers, et qu'on nomme éther; c'est dans ce dernier milieu que se propagent sous forme d'ondes toutes les perturbations que nous appelons chaleur rayonnante, lumière visi-ble ou invisible, oscillations électriques, rayons X, rayons non déviables par l'aimant émis par les corps radio-actifs. Quant à la matière, elle n'existe pas indépendamment des charges électriques: c'est une propriété de la matière d'être électrisée, comme d'avoir de la masse ou de l'étendue. Il y a deux espèces de matière: celle qui est liée à des charges électriques négatives, et qui forme les corpuscules, et celle qui est attachée aux charges positives, et que nous désignerons sous le nom de noyaux. Nous n'avons aucun renseignement

précis sur ces noyaux, sinon qu'il paraît y en avoir plusieurs espèces différentes ; c'est peut-être par eux que la matière se caractérise au point de vue chimique. Quant aux corpuscules, leurs dimensions sont très petites (environ la cent millième partie de celles d'un atome), ils ont tous même masse matérielle, même charge électrique, et sont animés de vitesses variables suivant les forces électriques et magnétiques auxquelles ils sont soumis, mais dont la limite supérieure paraît être la vitesse avec laquelle les ondes se propagent dans l'éther, c'est-à-dire 300.000 kilomètres par seconde.

Les corpuscules associés avec les noyaux forment les atomes ; en général, il y a juste assez de corpuscules pour que leurs charges négatives compensent la charge positive du noyau : par suite, l'atome paraît électriquement neutre. Ainsi, il y aura un millier de corpuscules dans l'atome d'hydrogène, vingt à trente mille dans l'atome de sodium, et cent mille dans l'atome de mercure ; ces corpuscules sont loin d'être en contact entre eux et avec le noyau ; ils sont séparés les uns les autres par des distances comparables, eu égard à leurs dimensions, à celles des planètes dans le système solaire ; pour donner une idée de cette éparpillement des corpuscules, Lodge imagine la comparaison suivante : grossissons chaque corpuscule jusqu'à la grandeur d'un point d'imprimerie ; l'atome sera alors

représenté par un édifice de 50 mètres de long, 30 mètres de large et 12 mètres de haut; aussi, dit-il, les corpuscules occupent-ils cet espace comme les soldats occupent un pays, c'est-à-dire qu'ils le parcourent en tous sens, et qu'ils repoussent tout objet étranger qui tenterait d'y pénétrer; ils font constamment des rondes dans l'espace qui leur est dévolu, tournant les uns autour des autres et autour du noyau avec une rapidité extrême, pouvant atteindre plusieurs millions de milliards de révolutions par seconde (nous tâcherons tout à l'heure d'expliquer comment ces nombres s'introduisent dans la théorie); il résulte de là que, pour léger qu'il soit, l'atome doit à cette activité de ses particules une énergie considérable, et Lodge essaie encore d'en donner une idée en disant que, dans un gramme d'hydrogène, il doit y avoir assez d'énergie pour élever toute la flotte anglaise au sommet du pic le plus élevé des montagnes d'Ecosse.

Laissons maintenant les atomes, électriquement neutres, s'agréger les uns aux autres sous l'action de forces que nous appelons affinité chimique, et dont la nature réelle nous est parfaitement inconnue, et cherchons comment un pareil système peut posséder les différentes propriétés que l'expérience a révélées. Dans le système solaire en réduction qu'est notre molécule hypothétique, il arrivera fatalement que quelques-uns des corpuscules

qui gravitent, en tourbillons vertigineux, autour des noyaux, s'en écartent sous certaines conditions favorables, comme la pierre projetée par le frondeur; ces projectiles qui sont comme les bolides des espaces intermoléculaires, iront, avec la vitesse prodigieuse qu'ils tiennent de la rotation, bombarder l'espace environnant; d'où une émission spontanée de corpuscules, particulièrement marquée chez le radium et ses congénères, mais que tous les corps possèdent, sans doute, à un moindre degré; ainsi, la radio-activité est, avec des différences d'énergie, une propriété commune à tous les corps. La matière, loin de se conserver indéfiniment, subit donc une évolution, elle vieillit, avec une vitesse insensible pour la plupart des corps, beaucoup plus grande pour le radium qui « préférant mener la vie courte et bonne », épuise en quelques siècles sa substance et ses merveilleuses propriétés. Telle est la conception à laquelle nous sommes amenés aujourd'hui, sans nous dissimuler qu'elle fait tomber au rang des approximations la grande loi de la conservation de la matière sur laquelle, depuis Lavoisier, reposent toutes les sciences et principalement la chimie.

La désagrégation spontanée de la matière n'est pas la seule possible : les corpuscules errants dont nous venons de parler peuvent à leur tour, en venant percuter les corps, en détacher d'autres corpuscules qui se séparent ainsi de l'agrégat

moléculaire ; et un effet analogue peut encore être déterminé par les ondes de l'éther ; nous savons que, loin d'être une mer tranquille, l'éther est parcouru en tous sens par les ondes qui transportent la lumière, les rayons X et certaines radiations des corps radio-actifs ; la molécule flotte dans ce milieu comme un radeau sur une mer tourmentée ; vienne à passer une vague plus forte que les autres, elle pourra briser le radeau et en disperser les débris ; pareillement, certaines radiations, en traversant l'éther, désagrègent les molécules et libèrent quelques-uns des corpuscules qui gravitaient dans leur ensemble.

Mais, que cette dislocation soit spontanée ou provoquée, deux cas pourront se présenter : si, en devenant libres, les corpuscules possèdent une grande vitesse, de plusieurs milliers de kilomètres par seconde, alors ils continueront à parcourir l'espace jusqu'à ce qu'un obstacle les arrête ; ils peuvent ainsi traverser des lames métalliques de plusieurs millimètres d'épaisseur ; tels sont les corpuscules isolés émanés d'une cathode ou du radium ; si, au contraire, leur vitesse est moindre, ils joueront alors un tout autre rôle : ils deviendront un centre d'agrégation pour les molécules voisines. Promenez un aimant dans la limaille de fer, ou un bâton de résine frottée dans la poussière, l'un et l'autre retiendront la matière attirée par leur magné-

tisme ou leur charge électrique. Le corpuscule électrisé négativement se recouvre de même d'une couche de molécules neutres, et sa vitesse diminue à mesure que sa masse augmente; le restant de la molécule incomplète délaissée par le corpuscule, et possédant une charge positive égale à la charge négative de ce dernier, joue de son côté un rôle analogue et raccroche au passage une dizaine de molécules; ainsi se forment des agrégats, électrisés positivement ou négativement, dont nous avons reconnu la présence dans les gaz et que nous avons appelé des ions. Quant aux ions qui se forment au sein des solutions et qui interviennent dans l'électrolyse, ils paraissent avoir une autre origine et une structure différente; nous ignorons encore par quel mécanisme le dissolvant intervient pour leur donner naissance; nous savons seulement qu'ils sont formés, suivant les cas, d'un ou de plusieurs corpuscules ou du résidu correspondant de la molécule, associés à d'autres molécules complètes.

* * *

Ainsi, on a pu imaginer une modification de l'hypothèse atomique dans laquelle tout le groupe des faits nouvellement découverts est venu s'encadrer sans trop de peine; il n'en faut pas être surpris, car jamais l'imagination des théoriciens

n'a été impuissante à expliquer, après coup, les phénomènes. La théorie optique de l'émission n'avait pas manqué, non plus, de s'accommoder des phénomènes d'interférence et de polarisation et il a fallu cinquante années d'efforts pour la jeter à bas. Aussi le véritable critérium des théories, ce n'est pas l'explication des faits connus, c'est la prévision de faits nouveaux ; or notre hypothèse a déjà traversé cette épreuve, et elle en est sortie triomphante ; c'est le point qui nous reste à établir.

Lorsqu'on analyse au moyen d'un prisme la lumière émise par les gaz ou les vapeurs incandescentes, on constate que ces corps fournissent un spectre discontinu, constitué de raies lumineuses séparées par des intervalles obscurs ; ils émettent donc un certain nombre de radiations distinctes, comme un piano dont on frappe simultanément plusieurs touches émet autant de sons séparés qu'il y a eu de touches frappées. Un aveugle qui entendrait ces sons, chercherait sans doute à se représenter l'instrument qui le produit ; pareillement, nous ne voyons point les molécules ; nous comprenons pourtant que leurs tourbillons agitent l'éther au sein duquel elles baignent, et lui impriment les mouvements ondulatoires que l'œil traduit en sensations lumineuses. Chacun des corpuscules qui tournent dans la molécule engendre une vibration de période égale à celle de sa propre rotation, et crée par

conséquent une de ces raies, ou radiations distinctes, que l'expérience nous révèle ; ainsi la complexité de la matière est traduite par la complexité du spectre qu'elle engendre.

En cherchant à préciser cette idée, le professeur hollandais Lorenz a été conduit à une conséquence singulière : les corpuscules électrisés négativement doivent être sensibles à l'action de l'aimant, qui modifie la forme de leurs trajectoires et la période de leur vibration ; en conséquence, les radiations provoquées par le mouvement de ces corpuscules doivent se modifier lorsqu'on approche un fort électro-aimant du corps lumineux qui les engendre ; cette conséquence de la théorie s'est trouvée merveilleusement vérifiée par l'expérience ; les déterminations de Zeeman, qui a constaté les lois expérimentales du nouveau phénomène, se trouvèrent en parfait accord, qualitatif et quantitatif, avec ce que la théorie avait fait prévoir, et les charges électriques des corpuscules, mesurées à l'aide de la perturbation des ondes lumineuses qui en émanent, furent identiques à celles qu'on avait pu déduire antérieurement de l'étude des rayons cathodiques et des corps radio-actifs. Une telle coïncidence ne saurait être fortuite, et les plus sceptiques ne sauraient refuser quelque intérêt à une théorie qui a reçu une vérification si précise.

Ainsi, depuis dix ans, nos idées sur la matière ont dû subir une modification telle, qu'elle équivaut presque à une reconstruction totale. Si nous n'avions pas perdu l'espoir de connaître jamais le fond des choses, nous serions amenés à nous poser bien des questions, à nous demander si tous les corps ne sont pas constitués, en définitive, par une seule et même matière, et si cette matière elle-même est une réalité distincte de l'éther. Mais s'il n'est pas interdit aux physiciens de rêver, il leur est défendu de croire que leurs rêves soient de la physique. Leur science est avant tout expérimentale, et leurs théories n'ont qu'un but : établir entre les faits et les lois empiriques une série de liens qui permettent une classification logique, et qui facilitent à la fois la mémoire des faits connus et la recherche des faits nouveaux. Or, nos théories nouvelles, constructions faites à la hâte pour contenir la récolte inattendue des dernières années, présentent bien ce double caractère. Évidemment, nous ne pouvons nous défendre d'une vague inquiétude en face de leur complication ; nous vivons encore, sans oser nous l'avouer, sur cette idée qu'une théorie doit être simple pour être vraie, et que tous ces accommodages successifs de l'hypothèse moléculaire n'ont pu que nuire à sa

solidité ; mais il vaut mieux avoir le courage de nous dire qu'il n'y a pas, en sciences, de théories vraies : il n'y a que des théories fécondes. Celle à laquelle nous nous tenons, en attendant mieux, est loin d'être simple ; mais la nature, elle aussi, est d'une effrayante complexité ; c'est là le fait important, et que l'expérience nous affirme. Les systèmes que nous imaginons pour la représenter peuvent être plus ou moins simples ou commodes : cela est d'intérêt secondaire. L'essentiel est d'avoir compris que, si loin que notre imagination ait placé les bornes de l'infiniment grand ou de l'infiniment petit, la réalité nous force à les reculer chaque jour davantage.

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	v
Le rôle des machines	1
Le moteur à gaz	37
Le transport et la distribution de l'énergie	69
Les Alpes industrielles.	109
L'électro-chimie.	143
L'éclairage par incandescence	181
La science et les applications du froid	213
Molécules, ions, corpuscules.	251

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

Librairie Armand Colin, 5, rue de Mézières, Paris.

Le Fer, la Houille et la Métallurgie à la fin du XIX^e siècle, par GEORGES VILLAIN. Un volume in-18 jésus, broché **3 50**

Fleuves, Canaux, Chemins de fer, par PAUL LÉON, avec une introduction de Pierre Baudin, député, ancien ministre des Travaux publics. Un volume in-18 jésus, avec 4 planches hors texte, broché. **4 »**

Dictionnaire-manuel-illustré des Sciences usuelles, par E. BOUANT, agrégé des sciences physiques, professeur au lycée Charlemagne. Un volume in-18 jésus, 2500 gravures, relié toile, tranches rouges. **6 »**

Revue générale des Sciences pures et appliquées : Chronique et Correspondance, Articles de fond, Bibliographie, Sociétés savantes, etc., paraissant les 15 et 30 de chaque mois. Directeur : LOUIS OLIVIER, docteur ès sciences.

ABONNEMENTS du 15 de chaque mois

SIX MOIS, Paris	11 »		UN AN, Paris	20 »	
— Départements	12 »		—	Départements	22 »
— Union postale	13 »		—	Union postale	25 »

Le numéro 1.25

Annales de Géographie, publiées sous la direction de P. VIDAL DE LA BLACHE, L. GALLOIS et EMM. DE MARGERIE, assistés d'un Comité de patronage; paraissant les 15 Janvier, 15 Mars, 15 Mai, 15 Juillet, et 15 Novembre

Les abonnés reçoivent gratuitement la *Bibliographie géographique annuelle* qui paraît le 15 Septembre.

ABONNEMENT ANNUEL de Janvier

France **20 »** | C. n. s. e. Union postale
Chaque numéro **4 »**. → *Bibliographie géographique* d'un volume **5**

5349 — Paris — Imprimerie républicaine