

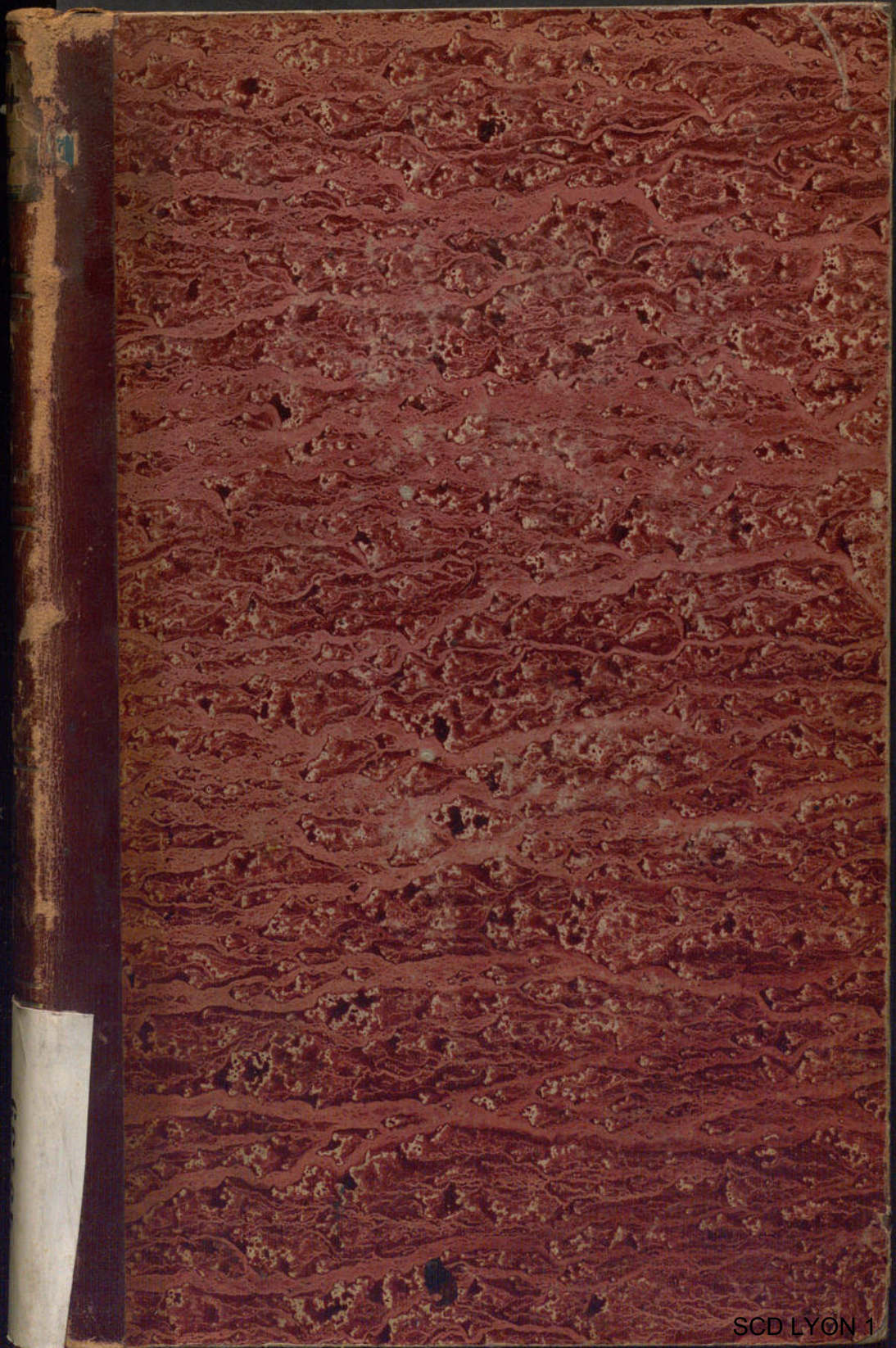
1847

MARTELL

COURS
DE
PHYSIQUE



45439



SCD LYON 1

+

I⁶ 12

CHAPITRE PREMIER

DE LA VIE

48.439

PHYSIQUE

COURS ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE.

DE PHYSIQUE

45,439

COURS ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

A L'USAGE

DES GENS DU MONDE

ET DES ASPIRANTS AUX PREMIERS GRADES UNIVERSITAIRES ;

PAR

MARIÉ-DAVY,

Docteur ès-Sciences, Professeur de physique à la Faculté des Sciences de Montpellier,
Membre de plusieurs Sociétés savantes.



MONTPELLIER,

Imprimerie de RICARD Frères, Éditeurs, plan d'Encivado, 3.

†
1851.



1843

COURS ELEMENTAIRE

DE PHYSIQUE

Handwritten notes:
1843
11/2/11

1843

DES TERNES DU MONDE

ET DES APPAREILS AUX PREMIERS COURS ELEMENTAIRES

MONTPELLIER

Imprimerie de RICHARD FRÈRES, Éditeurs, place d'Ecclésiastique, 1843



MONTPELLIER

Imprimerie de RICHARD FRÈRES, Éditeurs, place d'Ecclésiastique, 1843

1843



PRÉFACE.

Le nombre des ouvrages élémentaires de physique livrés au public dans ces dernières années, est devenu considérable. Plusieurs d'entre eux sont remarquables par la précision, par la clarté et l'élégance avec laquelle les phénomènes les plus importants ou les plus compliqués de la nature y ont été exposés et interprétés. Les brillants succès qu'ils ont obtenus témoignent à la fois des qualités qui les distinguent, et de la faveur toujours croissante qu'ils ont acquise à une science qui a d'ailleurs tant de titres à la bienveillance des hommes. Entièrement dévoué à la prospérité de la branche des connaissances humaines que nous sommes chargé d'enseigner, nous venons, à notre tour, lui apporter le tribut de nos efforts; nous avons pensé, en effet, qu'elle n'avait point encore été envisagée sous tous ses aspects, que les auteurs qui ont le plus efficacement travaillé à sa vulgarisation, n'embrassaient pas toutes les intelligences ou du moins toutes les situations dans lesquelles elles peuvent être placées.

Les jeunes gens qui veulent faire de la physique une étude sérieuse et profonde, trouveront, à des degrés divers,

dans les ouvrages de MM. Regnault, Pouillet, Lamé, Pecllet, Despretz, Person, Deguin, des guides sûrs et précieux, que nous avons nous-même bien des fois consultés; mais à notre époque d'impatience fiévreuse où l'étude est un moyen, rarement un but et un plaisir, trop souvent on recule devant ces volumineux traités. On voudrait traverser en courant le champ de la science, observer de haut l'ensemble de son domaine sans s'égarer dans les routes sinueuses qui le traversent en tout sens et offrent à leurs habitués tant de charmes.

C'est à la satisfaction de ce besoin caractéristique de notre temps que nous avons consacré cet ouvrage. Nous avons reculé plusieurs années devant les dangers d'une pareille entreprise; car, ainsi qu'on l'a dit bien des fois, rien de plus difficile à faire qu'un petit livre. Lorsqu'on nage en pleine eau dans une science dont on s'est rendu maître, avec un langage simple, de l'ordre et de la netteté dans l'esprit, on parvient toujours à faire un livre utile et aux autres et à soi-même; mais il est plus malaisé qu'on ne l'imagine de condenser la physique en un petit nombre de pages sans devenir aride et sec, ou sans étioier et décolorer la science. Une pratique de plusieurs années nous a convaincu qu'une nouvelle tentative devait être faite en faveur des jeunes gens pour qui la physique est d'une utilité pratique de tous les instants, et qui, emportés par les passions ou les exigences de la vie, ne lui jettent qu'un regard distrait et rapide, et en faveur d'hommes qui, pénétrés de l'importance qu'ont acquise de nos jours les connaissances générales en cette science, ont le désir de lui consacrer les rares loisirs qui leur sont laissés.

Pour les uns et pour les autres, nous nous sommes efforcé d'éloigner de notre livre tout ce qui pourrait en rendre la lecture pénible sans profit pour l'intelligence des

grands principes qui constituent la physique. Mais aussi nous n'avons point perdu de vue que nous nous adressions à des esprits agrandis déjà par l'étude ou par l'âge, et nous avons donné tous nos soins à la partie élevée et philosophique de notre sujet. Nous n'avons point le complet espoir d'avoir atteint notre but ; mais si notre livre, accueilli avec bienveillance, contribue pour sa part à l'expansion toujours utile de la science, au sentiment que nous avons accompli un devoir dans la limite des moyens qui nous ont été départis par la nature, viendra se joindre la satisfaction de ne l'avoir pas fait sans profit pour la science à laquelle nous nous sommes dévoué.

SCD LYON 1

COURS ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE.

LIVRE PREMIER.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

CHAPITRE I^{er}.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DE LA MATIÈRE ET DES CORPS.

1. Quand l'homme, moins préoccupé du soin de satisfaire ses besoins matériels, laissa errer son intelligence sur la nature, frappé de la grandeur du spectacle qui se déroulait à ses yeux, ému de sa propre faiblesse en présence des éléments indomptés, il créa la physique, science qui, dans ces temps reculés, embrassait la nature entière.

Par ses efforts continus, cette science grandit au travers des âges, et son domaine acquit une telle étendue, que l'intelligence de l'homme devint bientôt incapable de l'embrasser d'un même regard. Des divisions naquirent alors dans son sein, des lignes de démarcation y furent tracées de plus en plus nombreuses, et c'est fractionnée, morcelée à l'infini qu'elle a été transmise jusqu'à nous.

Divisions
des sciences
naturelles.

Corps organisés
et vivants,
corps bruts.

2. Les phénomènes (1) variés et multiples dont l'univers est le théâtre, et qui s'offrent de toutes parts à nos yeux, peuvent, en effet, se partager en plusieurs groupes bien distincts : la nature morte et la nature vivante obéissent à des lois spéciales. Ici les corps naissent d'êtres semblables à eux-mêmes, et n'ont qu'une existence limitée ; là, inhabiles à se reproduire, ils naissent du contact fortuit de corps dissemblables. La force qui préside à l'organisation des premiers porte en elle ou avec elle, dans l'accomplissement de son œuvre compliquée, les signes de leur inévitable fragilité : ce sont de délicates machines que brise le moindre choc, et qui s'usent fatalement par le simple frottement de leurs propres parties, quelle que soit la sollicitude avec laquelle la pensée qui les a fait naître veille à leur conservation. Dans les autres, rien d'instable ; les éléments qui les composent, satisfaits dans leurs affinités, sont dans un état d'équilibre et de repos qui en garantit la durée.

Physiologie,
chimie.

3. A ces deux grandes divisions des faits qui se produisent dans la nature correspondent deux sciences principales, la physiologie et la chimie : l'une suivant les forces organiques au travers du dédale des phénomènes auxquels elle donne naissance, l'autre bornant son ambition aux forces génératrices des corps bruts. Celle-là sonde avec une opiniâtre persévérance les mystères de la reproduction et de la conservation limitée des êtres vivants ; celle-ci s'attache

(1) Dans le langage de la science, ce mot ne conserve pas son acception vulgaire. Il ne signifie pas quelque chose de merveilleux ou de surprenant : il exprime tout changement, toute modification observée dans les corps. La chute d'une pierre, la fusion de la glace, sont des phénomènes pour le physicien.

aux transformations de la matière, quelque part qu'elles apparaissent.

4. A côté de ces deux sciences, et leur servant de lien et d'introduction, se place la physique moderne. Son domaine est partout, car elle ne s'adresse en particulier à aucun corps organique ou brut, dans l'examen des forces générales qui les sollicitent. Pesanteur, attraction moléculaire, chaleur, électricité, lumière, interviennent dans tous les phénomènes de la nature. La physique est donc une science éminemment générale. Les faits lui sont nécessaires pour arriver à la découverte des vérités qu'elle poursuit; mais classer ces faits en groupes plus ou moins naturels et nombreux n'est point son véritable objet; elle recherche les lois qui les embrassent et les dominant: ces lois seules constituent la science. Aussi, tandis que la chimie recherche pour chaque corps son passé, son avenir, les corps dont il provient, les corps qu'il produira, les conditions, enfin, dans lesquelles ont lieu ces métamorphoses diverses, la physique étudie les propriétés générales de la matière, et l'action des agents inorganiques qui l'impressionnent et en modifient les aspects.

Physique.

5. Tous les corps de la nature ont un lien commun: la matière dont ils sont formés. Tout en avouant qu'il ne connaît rien de la matière que les phénomènes même qui lui en font admettre l'existence, le physicien désigne de ce nom ce en quoi se passent ces phénomènes; il appelle *matière* tout ce qui tombe sous ses sens, et est soumis à l'action de la pesanteur.

Matière.

6. La matière peut impressionner nos sens de mille manières, suivant les temps, les lieux, les circonstances; sous ses aspects divers elle nous apparaît toujours douée d'une propriété générale constante, celle d'être *étendue*. La raison nous la montre également *impénétrable*; nous n'admettons

Étendue,
impénétrabilité.

pas, en effet, que deux portions différentes de la matière puissent occuper au même moment simultanément les mêmes points de l'espace. Étendue, impénétrabilité, sont les deux propriétés générales essentielles de la matière, celles que l'esprit, dans son plus grand désir d'abstraction, ne pourrait lui enlever sans l'anéantir. Pour le physicien, elle en présente d'autres non moins générales, non moins importantes, que nous allons énumérer et définir successivement.

7. La matière nous apparaît sans cesse et partout active; mais elle est dépourvue de cette activité capricieuse qu'on appelle la volonté. La régularité des phénomènes qu'elle nous présente a permis de rattacher ceux-ci à des forces peu nombreuses que l'on a abstraites de la matière pour les faire agir ensuite sur elle lorsqu'on les a définies à l'aide des faits qu'elles produisent.

Mobilité, inertie.

On attribue donc à la matière la propriété passive d'obéir aux impulsions qu'elle reçoit : on dit qu'elle est *mobile*. On la représente aussi comme *inerte*, c'est-à-dire dépourvue de toute puissance de modifier par elle-même l'état, quel qu'il soit, de repos ou de mouvement dans lequel elle se trouve. Du reste, il importe peu au physicien que la pesanteur, par exemple, ait été donnée à la matière comme une de ses propriétés originelles, ou que cette force indépendante de la matière lui ait été superposée par la nature.

Corps.

8. La matière est, dans l'espace, disséminée en parties isolées, distinctes, qu'on appelle *corps*. Dans chaque corps elle est aussi réunie par petits groupes juxtaposés que l'on appelle *molécules* ou *atomes*.

Porosité
des corps.

Il existe, en effet, dans tous les corps, une infinité de petits *pores* invisibles, mais dont l'existence peut être rendue manifeste par des expériences nombreuses. Ainsi l'eau suinte au travers des alcarazas, des tablettes de grès

des fontaines filtrantes ; la sueur s'échappe par les pores de la peau ; les liquides nourriciers circulent sans cesse au travers des tissus des animaux et des végétaux. Lorsqu'un œuf vieillit , une portion du liquide qu'il contient s'évapore au travers de la coquille , et est remplacée par de l'air qui en déterminera la putréfaction , ou , dans d'autres circonstances , au contraire , permettra au germe qu'il contient de se développer. Le marbre, les pierres, s'imbibent d'eau, d'huile, à une grande profondeur ; enfin, des académiciens de Florence ayant renfermé de l'eau dans une sphère d'or, et l'ayant comprimée fortement, virent le liquide suinter au travers de ses parois. D'une autre part, on sait avec quelle facilité certains liquides se mélangent entre eux, et *semblent* se pénétrer ; les gaz, les vapeurs, se mélangent plus facilement encore, et quelques-uns se dissolvent dans certains liquides avec une rapidité surprenante.

Ces divers phénomènes, joints à des considérations tirées de la chimie, tendent à nous faire conclure que la *divisibilité* de la matière ne saurait être portée, même par l'emploi des moyens les plus puissants, au-delà d'une certaine limite, il est vrai, très-éloignée. On sait, en effet, que les combinaisons chimiques qui s'effectuent entre des particules matérielles excessivement petites et invisibles aux meilleurs microscopes, sont impuissantes à détruire, à dénaturer ces particules qui peuvent toujours ressortir du composé avec toutes leurs propriétés primitives ; qu'en outre ces combinaisons se produisent toujours dans des rapports simples, déterminés.

9. Nous admettrons donc que les corps sont formés de petites masses ou *atomes* indivisibles *pour nous*, d'une ténuité insaisissable, et groupées en des proportions et suivant des lois diverses, de manière cependant à laisser entre elles des interstices ou pores. Des atomes d'une même nature

Divisibilité
de la matière
et des corps.

Atomes.

forment les corps simples, fer, plomb, or, argent, soufre...; mais quelquefois plusieurs atomes semblables ou différents se groupent ensemble pour former une particule complexe appelée *molécule*, et qui sert à constituer les corps composés, craie, marbre, sel, bois..., comme les atomes ont constitué les corps simples.

Molécules.

Tantôt les molécules ou atomes sont juxtaposés sans autre liaison que celles qui résultent des lois physiques, comme cela a lieu dans les corps bruts, et, dans ce cas, l'individu est formé par l'atome ou la molécule simplement; tantôt, au contraire, les particules matérielles sont dans un état de correspondance, de dépendance mutuelle sous l'action de la pensée ou force spéciale qui les a réunies, comme cela arrive dans les corps vivants. Dans ce dernier cas, l'individualité moléculaire fait place à une individualité d'un ordre supérieur, le végétal ou l'animal. Plus la relation des parties qui composent un tel système est intime, complète, plus aussi la vie organique de ce système est élevée.

Quant à la manière dont les molécules sont groupées dans les corps, nous l'ignorons; nous ne pouvons faire, à ce sujet, que des conjectures. Cependant, nous verrons que le volume des corps est, sans addition ni soustraction de matière, susceptible d'augmentation ou de diminution sous l'influence d'actions mécaniques ou d'un agent naturel, la chaleur. Il est donc permis de supposer que les molécules ne se touchent pas; qu'elles sont maintenues à distance par l'action combinée de deux forces antagonistes que nous aurons à étudier plus tard, et dont nous pouvons indiquer ici l'action d'une manière générale.

Attraction
moléculaire.

Répulsion
due au calorique.

10. Toutes les molécules matérielles organisées et vivantes ou mortes sont douées d'une *force d'attraction* réciproque, en vertu de laquelle elles tendent à se rapprocher indéfiniment; la *chaleur*, au contraire, est une force qui tend à

les éloigner sans cesse. Ces forces croissent rapidement d'intensité lorsque les distances moléculaires diminuent, mais la force répulsive plus rapidement que la force attractive, en sorte qu'il doit toujours exister une distance telle que l'égalité règne entre ces deux forces, et que les molécules soient dans un équilibre stable.

Vient-on à presser un corps, ses molécules se rapprochent jusqu'à ce que l'excès que prend la force répulsive sur la force attractive contre-balance la pression extérieure. Le corps a été *comprimé*. Mais, la pression cessant, l'équilibre temporaire est de nouveau rompu, et le corps, *élastique*, revient à son état primitif.

Compressibilité.

Élasticité.

Chauffe-t-on le corps, au contraire, on accroit l'intensité de la force répulsive; les molécules s'éloignent, le corps se *dilate* jusqu'à ce que la force répulsive, décroissant plus rapidement que la force attractive, redevienne égale à celle-ci.

Dilatabilité.

11. Les rapports qui existent entre ces deux forces, variables dans les divers corps, déterminent les trois états sous lesquels ils nous apparaissent : état solide, état liquide, état gazeux.

Des trois états
des corps.

Dans les solides, cet équilibre est nettement établi; mais ce qui caractérise particulièrement ces corps, c'est que les forces attractives et répulsives sont inégalement distribuées autour des molécules, en sorte qu'elles s'attirent plus énergiquement par certains côtés que par d'autres. Aussi, non-seulement ne peut-on comprimer ces corps qu'avec peine, mais même changer leur forme. Leurs molécules ont entre elles des rapports qu'on ne peut altérer sans résistance. Les corps solides ont donc une *forme* et un *volume* propres, et il n'est point nécessaire que chacune de leurs parties soit en équilibre sous l'action des forces

État solide.

extérieures, à cause des liaisons définies qui existent entre ces parties.

État liquide.

Dans les liquides, on ne remarque plus cette stabilité des rapports entre les parties; la distribution plus uniforme des forces autour de leurs molécules les rendant indifférentes à toute orientation, leur donne une mobilité qui les fait céder aux moindres efforts. Les liquides ont donc, comme les solides, un *volume* déterminé; mais ils n'ont plus de forme comme eux, ils prennent celle des vases qui les renferment.

État gazeux.

Dans les gaz, ni volume ni forme. La prédominance excessive et indéfinie de la force répulsive sur la force attractive, tend à accroître sans fin leur volume; il faut les coércer dans des vases clos de toutes parts. La mobilité des molécules y est encore plus parfaite que dans les liquides.

Au reste, nul de ces trois états n'appartient exclusivement à aucun corps. L'eau est solide au-dessous de zéro; elle fond à cette température, y reprend l'état liquide: à tout degré de chaleur, elle est susceptible de se transformer en vapeur. Réciproquement, on liquéfie les vapeurs ou les gaz, on solidifie les liquides. Il existe bien, il est vrai, des corps, comme le charbon, que l'on ne peut pas fondre par les moyens ordinaires, des gaz, comme l'air, que l'on n'est pas parvenu à liquéfier; mais de nombreuses analogies nous font admettre que ces résultats négatifs tiennent uniquement à l'insuffisance des moyens dont nous pouvons disposer.

CHAPITRE II.

CORPS SOLIDES, ÉLASTICITÉ DES SOLIDES.

12. Le passage des corps de l'un à l'autre de leurs états se fait pour chaque corps dans des conditions déterminées que nous étudierons plus loin. L'un d'eux cependant se présente avec des caractères particuliers que nous devons mentionner ici comme se rattachant plus directement aux propriétés générales des corps dont nous avons entretenu le lecteur dans le précédent chapitre.

Lorsqu'un corps fondu ou dissous a repassé d'une manière prompte à l'état solide, il nous apparaît comme une masse plus ou moins compacte, sans forme propre : on dit qu'il est *amorphe*. Les liaisons moléculaires ne s'y sont traduites au dehors que par la consistance nouvelle qu'elles lui ont donnée. Mais quand la solidification s'est produite dans des conditions plus favorables à l'orientation des molécules sous l'influence des forces dissymétriquement distribuées autour d'elles, on voit ces molécules, disposées d'une manière régulière, uniforme, engendrer des solides aux surfaces planes, brillantes, aux formes polyédriques, variées, mais toutes susceptibles d'être ramenées à six ou sept formes élémentaires et plus simples. Le corps a *cristallisé*, et nous a donné par cela même la clef des propriétés moléculaires qui constituent l'état solide.

Corps amorphes.

Corps cristallisés.

Le phénomène de la cristallisation n'est pas dû à une force superposée aux molécules, et dominant, comme les forces organiques, l'agrégat auquel elles doivent donner naissance : cette force de cristallisation n'est autre que la force d'attraction moléculaire, inhérente aux molécules elles-mêmes,

et modifiée dans son action par l'état spécial dans lequel celles-ci sont placées. Aussi la plupart des matières organisées sont-elles dépourvues de la faculté de cristalliser. Aucun fluide ne peut la posséder en tant que fluide.

État globulaire. 13. Un liquide abandonné à l'action des seules forces qui se développent entre les particules qui le composent prend toutefois une forme déterminée. Les gouttes d'eau, de mercure, d'huile, assez petites pour qu'on puisse négliger leur poids, deviennent spontanément sphériques. La masse terrestre abandonnée, immobile, à elle-même dans l'espace, aurait pris la même forme à l'époque où elle était fluide encore. Les déviations qu'elle nous présente à cette loi ont pour double cause le travail qui s'opère incessamment en elle-même, et le mouvement de rotation dont elle est animée. Nous aurions pu ajouter l'action de la lune et du soleil, qui produisent le phénomène des marées.

État vésiculaire. La mince pellicule qui recouvre les bulles de savon est parfaitement régulière et sphérique, et ce phénomène remarquable apparaît spontanément dans un grand nombre de circonstances. Lorsque de la vapeur se condense au sein de l'air, on voit se former une immense quantité de globules microscopiques dont les uns sont pleins, mais dont le plus grand nombre est creux. Les brouillards, les nuages, sont généralement formés de ces globules creux appelés *vésicules*. Long-temps ce dernier phénomène a pu être révoqué en doute. Il nous semble, toutefois, que M. Bravais l'a rendu évident en montrant que les arcs-en-ciel blancs que l'on aperçoit à de rares intervalles sont dus à l'existence des *vésicules* des nuages.

Les états cristallin, globulaire et vésiculaire, ne constituent pas, à proprement parler, des états particuliers de la matière, et distincts des états solide, liquide et gazeux

énumérés § 11 : ce sont plutôt des aspects sous lesquels les solides et les liquides se montrent à nos yeux.

14. L'état cristallin nous présentant les corps solides dans les conditions les plus favorables à l'exercice des forces intermoléculaires, accroît, en général, la *dureté* de ces corps, ou la résistance qu'ils opposent au déplacement relatif de leurs particules, et qui ne doit pas être confondue avec leur *cohésion*. Le diamant, le plus dur des corps connus, est très-fragile; l'acier fortement trempé, et devenu ainsi beaucoup plus dur que le fer, se brise quelquefois au plus léger choc; tandis que le plomb, d'une mollesse extrême, résiste très-long-temps aux percussions les plus intenses.

15. La cohésion ou tenacité des corps est extrêmement importante à connaître dans les arts. Voici quelques nombres représentant, en kilogrammes, le poids que des tiges de divers corps, d'une section supposée égale à 1^{mm}², peuvent supporter sans se rompre.

Métaux.		Bois dans le sens de leurs fibres.	
Fer forgé.....	41 ^k ,84	Buis.....	14 ^k
Tôle.....	58	Frêne.....	12
Fonte.....	13	Chêne de Malabar.	10,5
Métal des canons.	25,54	Sapin.....	8,4
Cuivre battu.....	24,86	Hêtre.....	8
— laminé....	21, 1	Chêne blanc.....	7
— fondu.....	13, 4	Poirier.....	6,9
Laiton.....	12, 6	Acajou.....	5,6
Plomb laminé....	1,35	Cordes.....	4

Les tiges ainsi tendues s'allongent proportionnellement à la traction tant qu'on ne dépasse pas la limite d'élasticité. Toutefois cet allongement ne se produit pas en entier dès le début. Sous l'influence d'une traction continue, et surtout d'ébranlements fréquemment répétés, un fil qui a résisté

Dureté.

Cohésion.

Tenacité.

d'abord finit souvent par se diviser. C'est pour cette cause que l'on fait rompre le pas aux troupes qui franchissent un pont suspendu.

Résistance
à l'écrasement.

La résistance à l'écrasement est, toutes choses égales d'ailleurs, plus grande que la résistance à la traction. Il y a cependant une limite à toute chose. Les ingénieurs ont pu comparer sous ce rapport les principaux matériaux qu'ils emploient. Ils ont reconnu que leur résistance diminue avec le temps; qu'elle varie suivant leur forme; qu'à base égale, par exemple, la colonne ronde résiste mieux que la colonne à base carrée; que les pierres ont plus de force quand elles sont placées dans le sens de leur lit naturel que dans tout autre.

16. Quand on surmonte la résistance que l'on éprouve à changer les rapports mutuels des molécules d'un corps solide, il peut arriver deux cas :

Élasticité.

1^o Si la déformation n'a pas dépassé une certaine limite variable avec le corps, l'action cessant, ce corps, *élastique*, revient à son état primitif, comme on le voit en infléchissant un ressort d'acier. Tantôt cette élasticité est très-étendue, comme dans le caoutchouc, les ressorts de montre; tantôt elle est très-restreinte, comme dans l'acier trempé à blanc et le verre, corps fragiles. Ici la réaction élastique est énergique, le corps est dur en même temps que fragile; là, au contraire, elle est beaucoup plus faible.

2^o Si on a dépassé la limite indiquée plus haut, ou bien le corps se brise (corps durs et fragiles, corps tendres et friables), ou bien le corps reste déformé, ses molécules reprenant un nouvel état d'équilibre, comme on le voit dans les corps mous, [ductiles et malléables.

Ductibilité, mal-
léabilité.

17. La ductilité et la malléabilité sont des propriétés précieuses des métaux, très-voisines mais non identiques.

Voici quelques corps rangés dans l'ordre de leur malléabilité décroissante : plomb, étain, or, zinc, argent, cuivre, platine, fer. Dans l'ordre décroissant de leur ductilité à la filière, il faut, au contraire, les écrire : platine, argent, fer, cuivre, or, zinc, étain, plomb. C'est que le passage des métaux à la filière fait intervenir, pour résister à la traction qu'on opère sur eux, la force de cohésion moins essentielle sous l'action du marteau.

18. L'élasticité des corps solides est soumise à des lois simples, que nous aurons à invoquer par la suite, et dont par conséquent nous devons dire ici quelques mots.

D'une manière générale, la déformation totale ou partielle d'un corps élastique développe une force de réaction qui, pour un même corps, est proportionnelle à l'étendue de la déformation. Tend-on un fil horizontalement entre deux

Fig. 1.



points fixes, et suspend-on un poids en son milieu? le fil se plie au point de suspension, et les deux côtés de l'angle ainsi formé s'allongent d'une quantité qui croît exactement comme la traction qu'on exerce sur eux, jusqu'à ce que la limite d'élasticité soit atteinte. Pendant cette opération, le volume total du fil augmente proportionnellement à la traction, comme il diminuerait, au contraire, s'il était comprimé.

Suspend-on un fil métallique verticalement à un point fixe, et le tord-on en faisant tourner sur lui-même le poids qui le tend? abandonné à lui-même, il reviendra à son premier état avec une force : 1^o inversement proportionnelle à sa longueur; 2^o directement proportionnelle à

Lois
de l'élasticité
des solides.

Compressibilité
des solides.

la quatrième puissance de son diamètre; 3^o *proportionnelle à l'angle dont on l'a tordu*, et il tournera sur lui-même comme un pendule autour de son point de suspension. Ces lois acquerront sans doute de l'importance aux yeux des lecteurs, lorsqu'ils se rappelleront que, grâce à elles, un mince fil d'argent a permis à Cavendish de mesurer le poids de notre terre, et par suite le poids du soleil, de la lune et des diverses planètes.

C'est à l'élasticité des corps et aux oscillations qu'elle produit que sont dus les phénomènes si importants de l'acoustique.

CHAPITRE III.

CORPS LIQUIDES. ÉLASTICITÉ DES LIQUIDES.

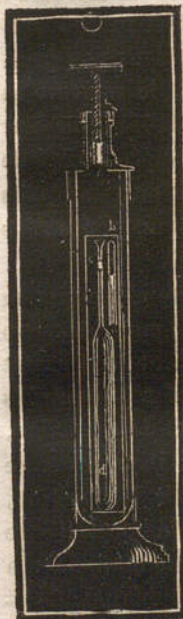
19. Les propriétés définies dans le précédent chapitre ont presque entièrement disparu dans les liquides; à peine en aperçoit-on des traces dans la viscosité que plusieurs d'entre eux nous présentent, car on pourrait facilement citer des corps qui forment pour ainsi dire une transition non interrompue entre l'état liquide et l'état solide. Les corps les plus nettement liquides conservent cependant des signes d'une cohésion sensible et assez grande pour qu'il en reste des gouttes suspendues aux corps qui y ont été plongés.

Compressibilité
des liquides.

20. Pendant long-temps on a considéré les liquides comme absolument incompressibles. Des académiciens de Florence ayant, au XVII^{me} siècle, renfermé de l'eau dans un sphère d'or, et l'ayant fortement comprimée, virent le liquide suinter aux travers des parois métalliques, et furent ainsi amenés à cette conclusion erronée. Depuis cette époque,

l'interprétation des phénomènes de la nature a fait d'immenses progrès. Les liquides se compriment sous l'action des forces extérieures, comme le font les solides; ils se compriment même plus facilement que ceux-ci.

Fig. 2.



OErsted a imaginé, en 1832, un appareil qui permet de mesurer exactement la compressibilité de l'eau et des autres liquides. Cet appareil, représenté dans notre *figure*, se compose de deux parties.

Appareil
d'OErsted.

Une petite bouteille *dc*, terminée par un tube capillaire en guise de col, est fixée sur une planchette de cuivre, et à côté d'elle un petit tube de verre *ab* fermé par un bout et renversé de manière que l'ouverture en soit placée en bas. Le liquide sur lequel on veut expérimenter est renfermé dans la petite bouteille, et surmonté d'un index de mercure *c* qui, logé dans le tube capillaire, isole le liquide de l'extérieur. Ce premier appareil est renfermé dans un autre plus grand, composé d'un fort cylindre en verre fermé à la partie inférieure qui est mastiquée dans un pied en cuivre, et muni supérieurement d'une monture également en cuivre dans laquelle se meut un piston conduit par une vis. Lorsque la bouteille garnie de son liquide et de son index est introduite dans le cylindre de verre, on remplit celui-ci d'eau que l'on comprime fortement à l'aide du piston. La compression se transmet intégralement de l'eau à la bouteille et au liquide qu'elle renferme, et on voit l'index descendre comme si le liquide dimi-

nuait de volume, ce qui a lieu réellement. La pression exercée sur le liquide est mesurée par la diminution correspondante de l'air logé dans le tube de verre renversé qui joue ici le rôle de manomètre, § 27; sa contraction l'est par la marche descendante de l'index de mercure : on peut donc comparer l'une à l'autre. C'est par un procédé de ce genre que l'on a trouvé que, sous une pression égale à la pression atmosphérique, le mercure se contracte des $0,0000034$, et l'eau des $0,0000478$ de leur volume, et que l'on a constaté que la compressibilité de ces deux liquides est proportionnelle à la pression qu'ils supportent. Celle des autres liquides est un peu moins rapide.

21. La bouteille de verre se contracte elle-même en même temps que le liquide qu'elle contient, mais beaucoup moins que lui. On s'en assurerait aisément en fermant à la lampe le tube capillaire, en ayant soin toutefois de laisser un vide au-dessus du liquide et de son index, et en renouvelant l'expérience précédente. Dans ce cas, le liquide soustrait à la pression exercée sur la bouteille, monterait au lieu de descendre, ce qui indiquerait une diminution dans la capacité de celle-ci. Cette diminution a été trouvée de $0,0000016$ pour chaque atmosphère. L'abaissement de l'index dans la première expérience n'exprime donc que la différence des contractions des deux corps, et il devient nécessaire de tenir compte de cette particularité.

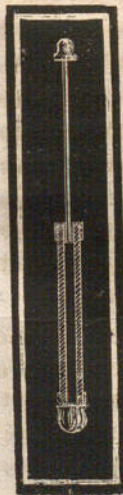
22. Un liquide comprimé revient toujours à son volume primitif quand il cesse de l'être. Dans ce sens, il n'y a point de limite connue à l'élasticité des liquides.

CHAPITRE IV.

CORPS GAZEUX. ÉLASTICITÉ DES GAZ.

23. La compressibilité des gaz n'a jamais été révoquée en doute. Non-seulement, en effet, elle atteint des proportions considérables, mais nous avons vu que les gaz tendent à accroître indéfiniment l'espace qu'ils occupent, et qu'on ne peut les restreindre dans un volume déterminé qu'à l'aide des pressions exercées sur eux. Prenez une vessie remplie d'air au tiers seulement de sa capacité; ses parois, flasques et sans consistance, n'accuseront aucune pression intérieure. Mais si vous la placez sous le récipient d'une machine pneumatique, et que vous fassiez le vide autour d'elle, à mesure que vous soutirez l'air, vous verrez la vessie se gonfler, ses parois se tendre comme si vous y eussiez insufflé de l'air

Fig. 3.



avec force. Ce n'est point, comme on l'a supposé long-temps, que la matière ait horreur du vide; mais l'air extérieur exerçait lui-même, sur la vessie, une pression qui contre-balançait la pression intérieure: la première disparaissant par le jeu de la machine, la seconde peut produire ses effets accoutumés.

Le briquet à air, *fig. 3*, nous peut également fournir un exemple du degré de compressibilité des gaz.

24. Plus un gaz s'étend, plus s'affaiblissent les efforts qu'il fait pour s'étendre au-delà, la pression qu'il exerce sur les obstacles qui s'opposent à son expansion, son *élasticité* enfin; car l'élasticité d'un gaz toujours comprimé est par cela même permanente.

Briquet à air.

Lois de Mariotte.

Fig. 4.

Tube
de Mariotte.

Mariotte, en France, et Boyle, en Angleterre, ont découvert à peu près en même temps les lois de l'élasticité des gaz. Dans les cours, leur indication expérimentale se fait au moyen de l'appareil de Mariotte, qui se compose d'un long tube de verre fermé et recourbé à l'une de ses extrémités, comme l'indique la *figure 4.* et fixé sur une planche de bois portant une échelle graduée le long de chaque branche du tube. On commence par verser dans le tube une certaine quantité de mercure qui doit s'élever dans les deux branches jusqu'au point *aa'* zéro commun des deux échelles graduées. De cette manière, on a isolé de l'air extérieur un volume déterminé d'air soumis à la pression atmosphérique dont la hauteur barométrique donne une mesure. Ce premier résultat obtenu, on verse du mercure dans la branche ouverte du tube, et on voit en même temps ce liquide s'élever graduellement dans la branche fermée, et comprimer le gaz qu'il y tient emprisonné. Lorsque le mercure, parvenu en *b*, a réduit de moitié le volume de cet air, il arrive que le mercure s'élève en *b'* dans la grande branche à une hauteur au-dessus de *b*, précisément égale à la hauteur barométrique, et que par conséquent la force élastique du gaz ou la pression qu'il supporte, et qui lui est égale, a été rendue deux fois plus grande.

Appareil
de MM. Dulong
et Arago.

25. La vérification de la loi qui nous occupe a été faite, dans des limites très-étendues, par MM. Dulong et Arago, et ultérieurement par M. Regnault. L'appareil dont se sont servis ces éminents physiciens pourrait être considéré comme un tube de Mariotte construit sur de très-grandes

dimensions ; seulement, au lieu de verser directement du mercure dans leur appareil, ils avaient disposé, sur le conduit horizontal qui en réunissait les deux branches, un vase de fonte plein de mercure et surmonté d'une pompe foulante. En faisant marcher cette pompe, on introduisait dans le vase de fonte de l'eau qui refoulait le mercure, et l'obligeait à monter dans les deux branches. Afin que les variations dans la température de l'air ne vinssent pas troubler la régularité du phénomène, la branche fermée était contenue dans un tube de verre plus large et rempli d'une eau sans cesse renouvelée. L'air et les autres gaz ont été soumis à des pressions croissantes qui se sont élevées, dans quelques cas, jusqu'à 27 atmosphères, correspondant à une colonne de mercure de 20^m,520 de hauteur. Ces expériences vraiment gigantesques ont démontré que l'élasticité d'un gaz ou la pression qu'il faut exercer sur lui pour la combattre, croît sensiblement en raison inverse de son volume, devenant 2, 3... 10, 20... fois plus grande quand son volume devient 2, 3... 10, 20... fois plus petit. Cette loi n'est pas, il est vrai, rigoureusement exacte ; la compressibilité de l'air et de l'azote est un peu plus rapide, celle de l'hydrogène un peu moins rapide que ne l'indique la loi ; mais les différences sont peu considérables et négligeables pratiquement quand on n'a pas besoin d'une précision extrême dans les résultats. Il n'en serait plus de même théoriquement. Malgré les immenses progrès accomplis dans la physique, l'obscurité nous environne de toutes parts, et il n'est point permis au physicien de négliger un phénomène de quelque mince importance qu'il nous semble au premier abord. D'ailleurs, il faut bien se garder de méconnaître le vrai caractère de nos lois. Nées du contact limité des faits qui nous sont connus, elles re-

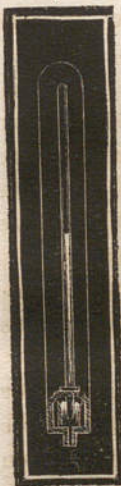
présentent, d'une manière plus ou moins complète, les seuls rapports qui nous apparaissent entre eux; ce sont des relations partielles et toujours transitoires, jusqu'au temps encore bien reculé où la vérité, dévoilée à nos yeux, viendra se montrer à nous dans sa grandeur et sa majesté.

26. La répulsion dans les gaz n'est point due à l'action d'une force unique et simple; elle naît du conflit de la répulsion calorifique et de l'attraction moléculaire. Cette attraction intervient dans la production du phénomène, et vient le compliquer en apparence. Cela est si vrai, que par le simple rapprochement de leurs molécules sous l'action d'une pression croissante, la plupart des gaz, chlore, acide carbonique, acide sulfureux, acide sulfhydrique, etc., changent brusquement d'état, la force répulsive s'effaçant tout à coup devant la force attractive devenue prépondérante. On ne doit donc pas être surpris si, pour ces gaz, la force élastique croît moins rapidement que ne décroît leur volume sous des pressions considérables. Voici des nombres obtenus par M. Gay-Lussac, et qui représentent les pressions sous lesquelles les gaz les plus connus passent de l'état gazeux à l'état liquide.

Liquéfaction des gaz.

Noms des gaz.	Températures.		Noms des gaz	Pressions en atmosphères.	
	Températures.	Pressions en atmosphères.		Températures.	Pressions en atmosphères.
Chlore	15°	4	Acide carbonique....	0	36
Acide chlorhydrique.	8	40	Protoxyde d'azote....	0	44
Acide sulfhydrique..	8	17	Ammoniaque.....	0	5
Acide sulfureux.....	7	2	Cyanogène	7	3

Fig. 5.



Manomètre.

27. La loi de Mariotte est d'une application fréquente dans l'industrie. C'est sur elle qu'est fondé l'emploi du manomètre, témoin précieux de la force de la vapeur dans les machines. Le manomètre représenté dans notre *figure* se compose d'un tube de verre fermé supérieurement et plongeant par sa partie inférieure dans un godet plein de mercure et logé dans une caisse en laiton. La vapeur pénètre dans la caisse, presse le mercure du godet, et l'oblige à monter dans le tube manométrique jusqu'à ce que l'air, ainsi comprimé, acquière une force élastique capable de contre-balancer celle de la vapeur. Le volume réduit de l'air indique donc cette force élastique de la vapeur. Nous avons vu également, dans l'appareil d'OErsted, un petit manomètre indiquer la pression exercée sur le liquide comprimé.

Avant de pénétrer plus avant dans l'examen des propriétés des corps, nous allons rappeler quelques notions générales de statique et de dynamique qu'il nous est important de connaître.

CHAPITRE V.

NOTIONS GÉNÉRALES DE STATIQUE.

Définitions. 28. On appelle force toute cause qui *tend* à modifier l'état actuel d'un corps. Nous disons *tend*, parce qu'une force ne produit pas nécessairement d'effet apparent, d'autres forces pouvant en neutraliser l'effet, lui faire *équilibre*.

Force.

L'examen des conditions nécessaires pour que cet équilibre ait lieu appartient à la *statique*, dont nous allons exposer les notions élémentaires les plus générales.

29. Quel que soit le nombre des forces qui agissent sur un même point, comme ces forces ne peuvent le déplacer que dans une seule direction à un moment donné, on conçoit qu'il existera toujours une force capable de produire à elle seule, sur le point, le même effet que toutes les autres réunies.

Résultantes, composantes. Cette force s'appelle *résultante*; les forces dont elle tient lieu sont nommées *composantes*.

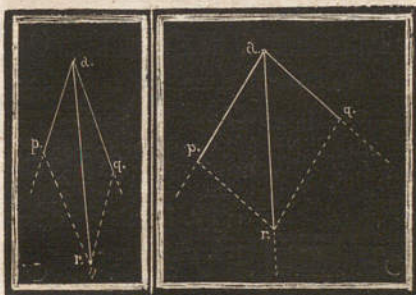
Une force, égale à la résultante, appliquée au même point, mais dirigée de sens contraire, pourra donc maintenir toutes les composantes en équilibre; en sorte que la recherche des conditions d'équilibre d'un système de forces peut se ramener à la détermination de la résultante de ces forces.

Composition des forces appliquées en un même point. Forces parallèles. 30. Les forces parallèles dirigées dans le même sens ont une résultante égale à leur somme. Si un même point est tiré à la fois par deux forces égales, l'une à 2, l'autre à 3, et agissant dans la même direction, le résultat sera évidemment le même que s'il était tiré dans ce sens par une force unique égale à 5.

Les forces parallèles, dirigées de sens contraire, ont une

résultante égale à leur différence et dirigée dans le sens de la plus grande.

Fig. 6.

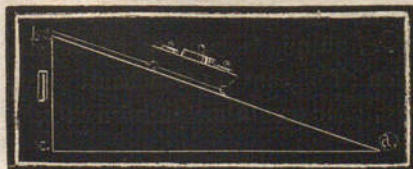


31. Deux forces appliquées en un même point A et dont les directions AP et AQ font entre elles un angle, ont une résultante représentée en grandeur et en direction par la diagonale AR du parallélogramme APRQ, construit sur les lignes AP et AQ proportionnelles aux forces proposées. La résultante de deux forces angulaires est donc toujours plus petite que la somme de ces deux forces, d'autant plus que l'angle des deux forces est plus grand.

32. Réciproquement, lorsqu'une force OR agit sur un point O, on peut toujours la décomposer en deux autres de directions données OP et OQ. Ces deux forces sont déterminées quant à leur intensité par la construction du parallélogramme OPQR construit sur OR comme diagonale.

33. Lorsqu'un point soumis à une force verticale, un poids par exemple, est situé sur un plan horizontal, il n'a aucune raison pour glisser à droite ou à gauche; il est naturellement maintenu en équilibre par la résistance du plan. Mais si ce plan est incliné à l'horizon, le point pesant

Fig. 7.



tend à glisser avec une force tangentielle qui reste cependant inférieure à la force verticale qui le sollicite. Soit BA

Forces non parallèles.

Décomposition des forces.

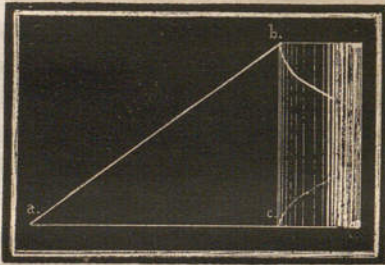
Applications.

Plan incliné.

le plan, BC sa hauteur : si BC est 10 fois plus petit que AB, la force tangentielle sera 10 fois plus petite que la force verticale. Mais aussi, pour s'élever jusqu'en B, le point parcourra le long de AB un chemin 10 fois plus grand que s'il montait le long de la ligne verticale BC. Ce résultat se retrouvera dans toutes les machines. Une machine ne crée pas de forces, elle n'accroît même pas la quantité de travail produite par une force, elle en dirige seulement l'emploi.

Vis.

Fig. 8.



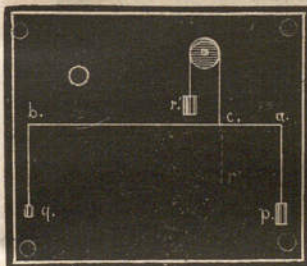
34. La vis n'est autre chose qu'un plan incliné enroulé autour d'un cylindre : ce que nous avons dit du plan incliné lui est donc applicable. En général c'est la vis qui marche pour soulever ou abaisser un écrou : la force nécessaire pour faire tourner la vis sans le secours du levier est à la force qui meut l'écrou dans le rapport de la hauteur BC du pas de vis à sa longueur BA.

35. Le coin est formé par la réunion de deux plans inclinés accolés par leur base. Lorsque cet instrument est placé entre deux obstacles, il tend à les écarter avec une force d'autant plus grande par rapport à la pression exercée sur sa tête, que cette tête est plus petite, et la longueur du coin plus grande. Aussi un instrument coupe-t-il d'autant plus que ses deux faces sont moins inclinées l'une sur l'autre, ou que la lame va en s'épaississant plus lentement en s'éloignant du tranchant, parce que, dans ces conditions, pour une même pression exercée

sur cet instrument, la force avec laquelle l'obstacle est divisé est plus grande.

36. Lorsque deux forces parallèles et de même sens P et Q , fig. 9, sont appliquées en deux points A et B liés invariablement entre eux, ces deux forces ont une résultante R de direction parallèle à la leur, agissant dans le même sens et d'intensité égale à la somme de leurs intensités; de plus, cette résultante est appliquée en un point C de la ligne AB , tel que les produits de chacune des deux

Fig. 9.



forces par la distance de son point d'application au point C soient égaux, ou que l'on ait $P \times AC = Q \times CB$.

Si on applique au point C une force R' égale et contraire à R , les deux forces P et Q seront maintenues en équilibre par son effort.

Considérons maintenant ce système équilibré des trois forces P , Q et R' . Rien n'empêche de supposer que P tienne en équilibre R' et Q . Une force égale et contraire à P serait donc la résultante des deux forces R' et Q .

D'où il suit que la résultante de deux forces parallèles dirigées de sens contraires ont une résultante égale à leur différence, dirigée dans le sens de la plus grande et parallèlement à elles deux. Le point d'application de cette résultante est situé sur le prolongement de la ligne qui joint les points d'application des composantes, du côté de la plus forte, et de telle manière que, comme précédemment, les produits des composantes par les distances de leurs points d'application au point d'application de la résultante soient égaux entre eux.

Composition
des forces
parallèles,

de même sens,

de sens
contraires.

Applications.

37. Les vérités énoncées dans ce paragraphe 36 sont d'une application immédiate aux leviers. Supposons, en effet, que le point d'application de la résultante soit fixe; l'action de cette résultante sera détruite, et nous aurons un levier en équilibre.

1. er genre.

On distingue plusieurs espèces de leviers suivant les rapports de position où se trouvent les trois points A, B et C. Dans la première, *fig. 10*, le point d'appui C est situé

Fig. 10.

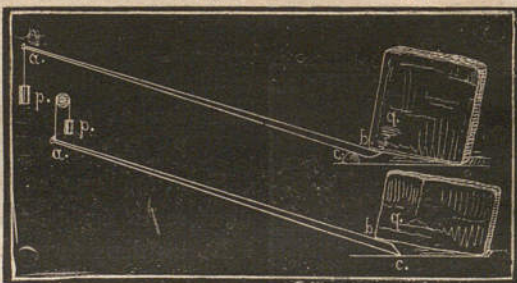


Fig. 11.

entre la puissance P et la résistance Q : ces deux forces agissent de même sens. Dans la seconde, *fig.*

2. me genre.

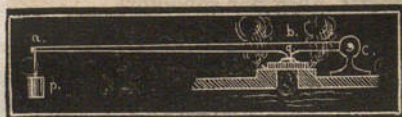


Fig. 12.

3. me genre.



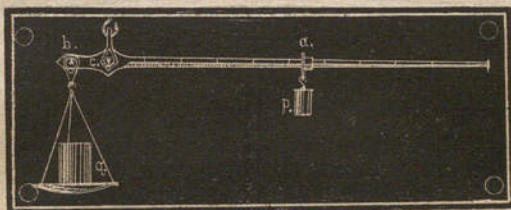
10 et *fig. 11*, la résistance est située entre le point d'appui et la puissance. La puissance et la résistance agissent de sens contraires. C'est la forme de levier la plus avantageuse, parce que le bras de levier de la puissance est le plus long possible. Dans la 3^e, *fig. 12*, la plus désavantageuse, c'est la puissance qui est placée entre le point d'appui et la résistance. Dans tous, pour qu'il y ait équilibre, il faut que l'on ait $P \times AC = Q \times CB$. Plus AC est grand, et plus la puissance P est petite; plus CB est petit, plus la résistance vaincue Q est grande.

Ces vérités donnent également une explication simple des instruments les plus généralement employés à la mesure des poids.

38. Dans la romaine, *fig. 13*, le corps Q que l'on veut peser est suspendu, à l'aide d'un crochet, à un point B situé

Romaine.

Fig 13.



près du point d'appui C. L'instrument est équilibré par le moyen d'un poids que l'on peut promener sur le bras de levier CA. Nous avons vu que, pour que l'équilibre existe, on doit avoir :

$$Q \times BC = P \times CA.$$

Si P est égal à 1 kilog., et CB égal à 1 centi., Q sera égal à AC ; c'est-à-dire que le poids Q du corps sera égal à autant de kilog. que CA contiendra de centimètres. L'inégale pesanteur des diverses parties de l'instrument modifie un peu ces relations ; mais le principe reste le même. Pour graduer une romaine, on accroche en B successivement un poids de 1^k et un poids de 10^k, par exemple. On note 1 et 10 les points où doit être placé le poids P pour que l'équilibre soit établi dans ces deux conditions ; on partage l'intervalle en 10 parties, et on continue la graduation en deçà jusqu'à zéro, et au-delà jusqu'au bout de l'instrument.

39. Dans la balance ordinaire, au contraire, les deux points A et B sont fixes, *fig. 14*, les deux bras de leviers sont égaux, et l'équilibre ne peut exister que quand les deux forces P et Q sont égales. Le poids d'un corps y est donc

Balance.

Balances

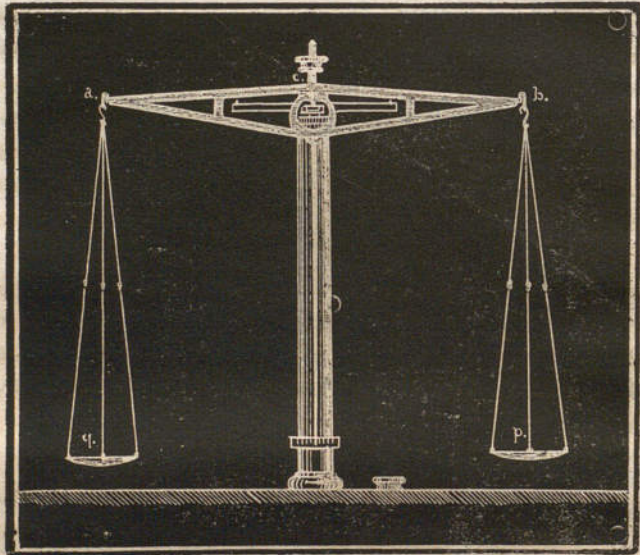
Balances

Balances

Balances

représenté directement par le nombre des poids marqués qui lui font équilibre. Réciproquement, pour qu'une

Fig. 14.



semblable balance donne des résultats exacts, il faut que les deux bras de levier ou les deux bras du fléau de la balance soient égaux; il faut aussi qu'à vide, les deux bassins se fassent contre-poids. La dernière de ces conditions est toujours facile à remplir; la première est, au contraire, très-délicate à réaliser. Heureusement une légère imperfection est de peu d'importance dans les balances ordinaires, et dans les expériences qui exigent une grande précision, on peut s'en rendre indépendant au moyen de la méthode des doubles pesées.

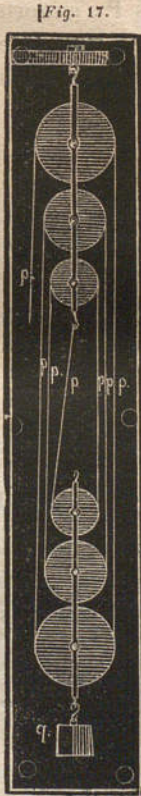
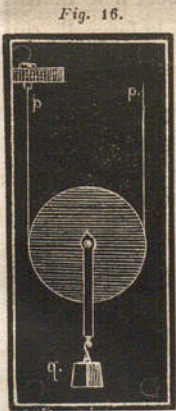
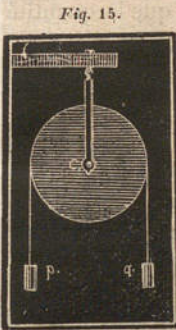
Méthode
des doubles
pesées.

Lorsqu'on veut peser un corps par cette méthode, on le place dans l'un des bassins d'une balance, on lui fait équilibre à l'aide de grenaille de plomb placée dans l'autre bassin. Lorsque ce résultat est obtenu, on enlève le corps

et on le remplace par des poids marqués. On est sûr ainsi d'obtenir un résultat exact. Cette double opération n'est toutefois nécessaire que dans un nombre limité de cas.

40. Toutes les machines simples peuvent être ainsi ramenées à la théorie des leviers.

Une poulie, par exemple, est un levier dont les deux bras



sont toujours égaux ; le cordon qui l'embrasse ne peut être en équilibre qu'autant qu'il est tiré à ses extrémités par des forces égales, *P*, *fig. 15*. La force qui tire la poulie elle-même est donc égale à $2P$ si les deux bouts du cordon sont parallèles ; et si l'un de ces bouts est attaché à un point fixe, *fig. 16*, on pourra, avec une force égale à *P*, soulever un poids *Q* égal à $2P$ suspendu à la poulie. Les moufles, *fig. 17*, composés de deux systèmes de poulies réunies entre elles par des parties solides, augmentent encore l'effet de la puissance dans un plus grand rapport. L'appareil représenté dans notre *figure*, est composé de deux systèmes de trois poulies

chacun. L'un de ces systèmes est suspendu à un point fixe ; l'autre supporte un poids *Q*. Tous deux sont réunis par

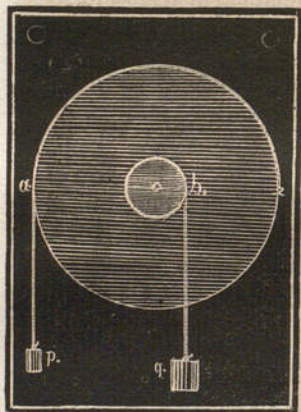
Poulies.

Moufles.

un même cordon qui embrasse successivement toutes les poulies. Si l'extrémité libre de ce cordon est tirée par un poids P , ses diverses branches sont tendues par le même effort; et comme 6 d'entre elles soutiennent le moufle mobile, le poids Q qui y est attaché devra être égal à $6P$; mais aussi l'espace qu'il parcourt sera 6 fois plus petit que l'espace parcouru par le poids P , en sorte que la quantité de travail reste la même, abstraction faite des frottements, qui, inséparables de toute machine, diminuent cette quantité de travail.

Treuil.

Fig. 18.



41. Les treuils et cabestans rentrent dans la même théorie des leviers. Si, dans le treuil représenté de face dans notre *fig. 18*, le rayon de l'arbre est 10 fois plus petit que le rayon de la roue qui sert à le mettre en mouvement, la force P , qui agit sur celle-ci, maintiendra un poids Q dix fois plus fort qu'elle. Il en sera de même si la roue est remplacée dans cet instrument par un levier; seulement la longueur de ce levier devra

être substituée au rayon de la roue dans la comparaison précédente.

CHAPITRE VI.

NOTIONS GÉNÉRALES ET ÉLÉMENTAIRES DE DYNAMIQUE.

42. Lorsque les forces qui agissent sur un corps ne s'y font pas équilibre, le corps entre en mouvement et se meut d'après des lois différentes, suivant la nature des forces qui l'animent.

On distingue celles-ci en deux classes : les *forces instantanées* et les *forces continues*.

Ces deux expressions, qui se définissent d'elles-mêmes, n'ont pas toutefois une signification absolue. Lorsque l'on considère une force pendant son action, quelle qu'en soit d'ailleurs la durée, elle est dite continue ; le mouvement qu'elle produit est *varié*. Mais si la force cesse d'agir sur le corps à un moment donné, à partir de ce moment, le mouvement devient *uniforme*, exactement comme si la force eût été réellement instantanée, ce qui n'a jamais lieu.

43. La matière ayant été abstraite de toute force capable de la modifier, sauf, ultérieurement, à lui superposer des forces définies qui engendrent les phénomènes qui nous entourent, il est clair qu'un mobile lancé dans l'espace et supposé soustrait à toute influence extérieure, n'aura plus en lui rien qui puisse altérer ni sa vitesse, ni la direction dans laquelle il se meut. Son mouvement sera *indéfini, rectiligne et uniforme*. Un tel mouvement est purement théorique, car il ne nous est jamais donné d'observer un corps entièrement soustrait aux influences extérieures : il est cependant utile à considérer en ce sens qu'il conduit à une définition nette de la vitesse. Qu'est-ce que la vitesse d'un corps ? Nous l'ignorons absolument. Le mot vitesse exprime une de ces idées irréductibles en éléments plus simples, et

Définitions.

Forces
instantanées,
continues.Mouvement
uniforme
rectiligne.

Vitesse.

par suite impossible à définir. Nous pouvons cependant comparer les vitesses; nous jugeons qu'un corps se meut plus vite qu'un autre, quand dans le même temps il parcourt un plus grand espace que ne le fait ce corps. La vitesse constante du mouvement uniforme d'un corps peut donc être mesurée par l'espace parcouru par ce corps pendant l'unité de temps ou la seconde.

Mouvement
varié.

44. Pendant la durée même de l'action d'une force motrice, le mouvement est beaucoup plus compliqué : sa direction peut changer d'une manière continue comme dans toutes les rotations; sa vitesse, qui est généralement variable, en devient plus difficile à définir. Pour avoir une mesure de cette vitesse à un moment donné, il faut supposer que le mobile soit entièrement soustrait à l'action de toute force perturbatrice, et mesurer alors l'espace que dans une seconde, il parcourra d'un mouvement devenu uniforme et rectiligne.

Composition
des vitesses.

45. Les lois des mouvements produits par les forces continues reposent sur un principe que nous allons énoncer et qui est d'une grande importance. *L'effet produit par une force est indépendant de l'état de repos ou de mouvement du corps sur lequel elle agit.* Une force appliquée à un mobile primitivement en repos, lui a imprimé, au bout d'une seconde, une vitesse de 10^m par exemple? Cette même force, agissant sur le même mobile animé cette fois d'une vitesse de 200^m dans la direction même de la force, imprimera encore au mobile une vitesse de 10^m , au bout de la seconde, en sorte que la vitesse finale sera de 210^m ou de 190^m , suivant que les vitesses seront dirigées de même sens ou de sens contraires. Les vitesses se composent donc, dans ce cas, exactement comme les forces le feraient dans les mêmes conditions.

Il en est encore de même quand les deux vitesses font un angle. Le mobile ne suit ni l'un ni l'autre des côtés de l'angle, mais une ligne intermédiaire, et précisément la diagonale du parallélogramme construit sur les deux *vitesse* composantes. Cette même diagonale représente également la grandeur de la *vitesse résultante*.

46. Le mouvement varié le plus simple est celui où la force motrice est constante et toujours dirigée dans le sens du mouvement. Celui-ci est alors rectiligne et uniformément varié. Chaque seconde voit s'accroître la vitesse d'une quantité constante. On dit alors que la vitesse est proportionnelle au temps. Dans ce cas, l'espace parcouru croît proportionnellement au carré du temps. La chute des corps tombant librement dans le vide nous offrira un exemple de ce mouvement qui est relativement rare dans la nature.

Mouvement
rectiligne
uniformément
varié.

47. Nous y rencontrons, au contraire, des exemples très-nombreux de mouvements curvilignes qu'il nous est impossible d'étudier ni même d'énumérer ici. Nous ferons seulement observer que, pour qu'un semblable mouvement soit produit, il faut nécessairement que la force motrice puisse fournir une composante normale à la ligne parcourue par le mobile et dirigée vers l'intérieur de la courbe qu'il décrit. Cette composante, qui a pour unique effet, non d'accélérer le mouvement, mais de l'infléchir, s'appelle *force centripète*. La force égale et contraire qui n'existe réellement pas, mais que l'on substitue souvent dans le langage à la force centripète, est la *force centrifuge*. Dans la rotation de la terre autour du soleil, ou de la lune autour de la terre, ces astres sont retenus à la distance où ils se trouvent par la force d'attraction universelle. Lorsqu'une fronde est en mouvement, c'est la résistance du cordon tendu qui retient la pierre dans le cercle qu'elle parcourt; la tension du

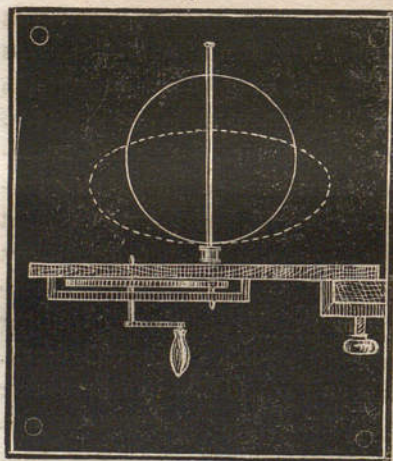
Mouvements
curvilignes.

Force
centripète.

Force centrifuge.

cordons est égale à la force centripète ou à la force centrifuge. Lorsqu'un vase ouvert et plein d'eau tourne dans un plan vertical autour de l'extrémité fixe de la corde qui le soutient, l'eau tend à s'éloigner du centre suivant la tangente au cercle qu'elle décrit. Alors même que le vase au haut de sa course se trouve renversé, la pesanteur de l'eau suffit à peine à la ramener sur la courbe, et on n'observe plus en elle aucune tendance à tomber : on dit, dans ce cas, que la force centrifuge a détruit l'action de la pesanteur. Notre *fig. 19* représente un ressort d'acier qui est circulaire quand

Fig. 19.



il est en repos, et que le mouvement de rotation sur lui-même aplatit et élargit dans le sens du mouvement. C'est l'élasticité et la tenacité du ressort qui combat la force centrifuge. Sur un cercle, la force centripète ou la force centrifuge F est proportionnelle au carré de la vitesse V du mobile, et en raison inverse du rayon du

cercle R . Sur une autre courbe, la loi serait la même ; seulement il faudrait remplacer R par le rayon du cercle qui se rapproche le plus possible de la courbe au point de cette courbe où on considère le mobile.

Lorsqu'un projectile est lancé verticalement de bas en haut, sa vitesse ascendante est à chaque instant diminuée par l'action de la pesanteur qui tend à le faire marcher en

Mouvements
des projectiles.

sens contraire; et sans la résistance de l'air qui restreint sa marche, il s'élèverait à une hauteur telle, qu'en retombant ensuite librement, il acquit au point de départ précisément la vitesse qu'il avait au moment où il en est parti. Si le projectile a été lancé obliquement, avec une vitesse telle que, sans la résistance de l'air et l'influence de la pesanteur, il attint, au bout de $3''$, un but situé à 200^m , comme l'espace parcouru en $3''$ par un corps tombant librement dans l'espace est de $44^m,1$, c'est un point situé à $44^m,1$ au-dessous du but qu'il frappera. Les tireurs et les artilleurs connaissent parfaitement ce fait: aussi change-t-on la ligne de mire suivant la charge du canon et la distance de l'objet que l'on veut atteindre. On a un exemple exagéré de la courbe décrite par un boulet ou une bombe en lançant une pierre dans des directions plus ou moins inclinées à l'horizon.

48. La vitesse d'un mobile est liée intimement à la masse de ce mobile, à l'intensité de la force qui le pousse, et à la durée de l'action de celle-ci.

1° Le § 45 nous montre, en effet, qu'une force constante agissant pendant des temps croissant comme les nombres 1, 2, 3..., sur un même mobile, doit lui imprimer des vitesses égales à $1.V$, $2.V$, $3V$ Si la force n'est pas constante, la loi n'est pas aussi simple, mais la vitesse n'en croît pas moins avec le temps.

2° Lorsque des forces égales à P , $2P$, $3P$..., agissent sur un même mobile ou des mobiles de masses égales, elles impriment à ces mobiles des vitesses V ., $2V$, $3V$.. d'autant plus grandes que la force est plus grande.

3° Lorsqu'une même force, au contraire, ou des forces égales agissent sur des mobiles divers dont les masses sont égales à M , $2M$, $3M$, elles leur impriment des vitesses

Relations entre
la force,
le temps de son
action,
la masse du
mobile,
la vitesse qu'il
acquiert.

$1V \frac{1}{3}V \frac{1}{3}V \dots$ d'autant plus petites que les masses mises en mouvement sont plus grandes. Pour animer ces masses $M, 2M, 3M$ de vitesses égales, il faut faire agir sur elles des forces $F, 2F, 3F \dots$ qui leur soient proportionnelles.

On sait que, toutes choses égales d'ailleurs, un fusil portera d'autant plus loin qu'il sera plus long, parce que les gaz provenant de la déflagration de la poudre agiront plus long-temps sur le projectile ; que celui-ci sera lancé d'autant plus loin, sinon d'autant plus juste, que la charge de poudre sera plus forte ; qu'enfin cette charge doit être d'autant plus grande pour produire le même effet que la masse de plomb ou de fer est plus considérable.

LIVRE DEUXIÈME.

PESANTEUR.

CHAPITRE I^{er}.

EFFETS GÉNÉRAUX DE LA PESANTEUR.

49. Dans le précédent chapitre, nous avons énoncé quelques-unes des principales propriétés de la matière. Les énumérer toutes et en faire l'histoire serait embrasser l'étude de la nature dans toute sa généralité, et nous avons posé les limites qui restreignent le sujet que nous traitons ici. Parmi ces propriétés, une des plus importantes à étudier pour le physicien est cette tendance que présentent tous les corps à tomber sur la terre. Abandonnés à eux-mêmes, nous les voyons descendre plus ou moins rapidement vers le sol ; soutenus par un obstacle, ils exercent sur lui une pression continue ; ils *pèsent* sur lui.

50. Quelques corps semblent faire à cette loi universelle une exception qui n'est point réelle. Tous les corps *pèsent* : s'il en est qui s'élèvent dans l'atmosphère, c'est qu'ils sont poussés de bas en haut par une force supérieure à leur poids, et dont nous rechercherons l'origine et les effets. L'air lui-même est pesant.

Prenez un ballon de huit à dix litres, et dont le col soit garni d'une monture à robinet fermant bien, suspendez-le à l'un des bassins d'une bonne balance, établissez l'équilibre au moyen de poids placés dans l'autre bassin ; puis

Tous les corps
pèsent.

Pesanteur
de l'air.

retirez le ballon, soutirez l'air qu'il contient au moyen de la machine pneumatique dont nous donnerons plus tard la description, et suspendez-le de nouveau à la balance : l'équilibre n'existera plus, le ballon sera devenu plus léger. Si vous ôtez alors des poids pour le rétablir, et que vous ouvriez le robinet pour laisser rentrer l'air, vous verrez la balance s'incliner en sens contraire sous le poids du ballon redevenu plus grand.

La pesanteur agit de la même manière sur tous les corps.

51. Non-seulement la pesanteur agit sur tous les corps, mais elle agit sur tous de la même manière, ce qui a fait admettre l'existence d'une seule matière dont les groupements variés donnent naissance aux divers corps. Tous les corps placés à la même hauteur tomberont avec la même vitesse si on les soustrait, dans leur chute, à l'action retardatrice de l'air. Prenez un long tube de verre de plusieurs centimètres de large, fermé à un de ses bouts, et muni à l'autre d'une monture à robinet. Introduisez-y des grains de plomb, des morceaux de papier, des plumes légères ; faites-y le vide au moyen de la machine pneumatique ; puis, le tenant vertical, renversez-le brusquement. Ces corps si dissemblables arriveront en bas au même instant. Mais si, ouvrant le robinet, vous laissez rentrer successivement des quantités nouvelles d'air, et que vous répétiez chaque fois l'expérience, vous verrez la marche relative des corps légers se ralentir de plus en plus. La résistance de l'air produit d'autres effets bien connus ; c'est elle, en particulier, qui fait diviser les liquides pendant leur chute : dans le vide, ils tombent tout d'une pièce, et produisent un choc analogue à celui des corps solides.

Chute des corps dans le vide.

La pesanteur n'est point une force nouvelle pour nous ; elle n'est, en effet, que la manifestation à distance de cette attraction moléculaire qui, suivant les conditions au mi-

lieu desquelles elle agit, modifie de mille manières la consistance et l'aspect des corps. Chaque particule de la masse terrestre attire chaque particule d'un corps pesant, et la résultante de toutes ces forces élémentaires constitue le poids de ce corps.

Le poids d'un corps est proportionnel à la quantité de matière qu'il renferme ou à sa *masse* : si le plomb paraît plus lourd que le liége, c'est que, sous un même volume, le premier contient plus de matière que le second. Nous avons donc, dans les poids, un moyen simple de comparer les masses, sans que nous ayons besoin de connaître la matière en elle-même : des corps pesant $P, 2P, 3P, \dots$, auront des masses $M, 2M, 3M, \dots$. De même, le poids de l'unité de volume d'un corps, son *poids spécifique*, pourra servir de mesure au degré de condensation de la matière dans ce corps, à la quantité de matière qu'il renferme sous l'unité de volume à sa *densité*.

La mesure du poids des corps se fait en général à l'aide des balances ou des romaines. Ici, comme dans la mesure de toutes les grandeurs ou quantités, il s'agit d'une simple comparaison avec une grandeur ou quantité de même nature prise pour unité. L'unité de poids est le *gramme* qui n'est autre chose que le poids d'un centimètre cube d'eau distillée ramenée à son maximum de densité. Tous les poids sont exprimés en fonction de cette unité ou en fonction de ses multiples ou sous-multiples adoptés conventionnellement dans la pratique. Ce sont des poids *relatifs*.

Le poids *absolu* d'un même corps varie avec l'intensité de la pesanteur qui agit sur lui. Transporté sur une haute montagne, ce corps pèsera, en réalité, un peu moins qu'au fond de la plaine ; mais sa mesure ou son expression en poids restera la même, parce que les poids marqués aux-

Poids d'un corps.

Proportionnalité
des poids
aux masses.Poids
spécifique.

Densité.

Mesure
des poids.

Gramme.

Poids relatifs.

Poids absolus.

quels on le compare subissent les mêmes influences. La balance ne saurait donc accuser des variations dans l'intensité de la pesanteur à la surface du sol ; et alors même que cette force viendrait à changer brusquement , les nombres qui représentaient les poids relatifs des corps avant les représenteraient encore exactement après.

Le poids absolu d'un corps peut seul servir de mesure à sa masse ou à la quantité de matière qu'il contient. Mais dans un même lieu , poids absolu , poids relatif , masse ou quantité de matière , sont des quantités exactement comparables , et représentées par les mêmes nombres ; en sorte que , dans le langage , on les prend souvent l'une pour l'autre.

La propriété de s'attirer , inhérente à la matière et appelée ici pesanteur , la force moléculaire , n'est point limitée à notre terre ; elle s'étend jusqu'aux confins de notre système planétaire , et probablement jusqu'à l'indéfini. Quand elle s'exerce ainsi entre les divers corps célestes , elle prend le nom d'*attraction universelle* , et rentre plus particulièrement dans le domaine de l'astronomie. Elle est soumise alors aux lois simples suivantes :

Attraction universelle.

Sees lois.

1^o L'attraction qui s'exerce entre deux corps célestes varie en raison inverse du carré des distances qui les séparent ; devenant 2×2 , ou quatre fois plus petite quand cette distance devient deux fois plus grande.

2^o Elle est proportionnelle à la masse et du corps qui attire et du corps qui est attiré , c'est-à-dire à la quantité de matière qu'ils contiennent.

Lois de la pesanteur.

52. La pesanteur , ou attraction de la terre sur les corps situés à sa surface , est soumise aux mêmes lois ; mais nous devons remarquer qu'il faut considérer les distances qui séparent ce corps du centre de la terre , et non du point le plus rapproché de sa surface ; et comme le rayon de la

terre est de près de 1500 lieues, on peut en général négliger, devant cette énorme distance, les hauteurs peu considérables auxquelles les corps s'élèvent au-dessus du sol. Il n'en serait plus ainsi dans des cas où il serait besoin d'une grande précision.

53. Les lois de la chute des corps tombant librement dans l'espace, découlent naturellement de ce qui précède. Cette chute se faisant d'une hauteur négligeable en présence des dimensions colossales de la terre, on peut admettre que, pendant sa durée, la pesanteur agit sur le corps avec une intensité constante; et comme la pesanteur agira également sur lui d'une manière continue, chaque instant nouveau verra la vitesse du mobile s'accroître d'une quantité nouvelle et constante, § 45, ce qu'on exprime en disant : *que la vitesse d'un corps tombant librement dans l'espace, croît avec la durée de sa chute et proportionnellement à cette durée.* L'expérience a démontré qu'au bout d'une seconde, la vitesse, à Paris, est de $9^m,8088$; au bout de deux secondes, $2''$, elle sera donc de $19^m,6176 = 9^m,8088 \times 2$; au bout de $3''$, de $29^m,4264 = 9^m,8088 \times 3$. Cette vitesse est purement théorique, car la résistance de l'air viendra la diminuer d'une manière sensible. Les nombres précédents peuvent cependant donner une idée de la marche du phénomène.

L'espace parcouru dans les mêmes conditions théoriques suit une loi plus rapide : *il croît proportionnellement au carré des temps employés à le parcourir.* L'espace parcouru dans la première seconde de temps étant, à Paris, de $4^m,9044$, l'espace parcouru dans les deux premières secondes sera de $4^m,9044 \times (2 \times 2) = 19^m,6176$, pendant les trois premières secondes de $4^m,9044 \times (3 \times 3) = 44^m,1396$ Nous ferons, à l'égard des espaces, la remarque appliquée aux vitesses : ils seront, dans la pratique, moindres que ne l'indique la théorie, à cause de la résistance de l'air.

Lois de la chute
des corps.

Loi des vitesses.

Loi des espaces.

Vérification
expérimentale
de ces lois.

Machine
d'Atwood.

Fig. 20.



54. Ces deux lois peuvent se démontrer par l'expérience, à l'aide de la machine d'Atwood, dont l'objet est de ralentir la chute des corps assez pour la rendre facilement observable, sans cependant en changer les lois.

Cet instrument se compose essentiellement d'une poulie en cuivre très-légère, mobile autour d'un axe horizontal. Sur la gorge de cette poulie s'enroule un cordon de soie très-fin, aux deux extrémités duquel sont suspendues deux masses égales p et p' qui s'y font équilibre dans toutes les positions. Mais si l'on vient à ajouter à l'une de ces masses p une petite masse additionnelle m , l'équilibre sera rompu : la masse pm descendra, entraînant dans son mouvement l'autre masse p' . Or, en faisant varier la masse m , et en observant les vitesses correspondantes du système, on peut constater que cette vitesse varie comme le rapport de m à $m+p+p'$, § 48. C'est-à-dire que si $p=p'=24$ grammes, et que $m=1$ gr., en sorte que $p+p'+m=49$ gr., la vitesse du système sera, en négligeant la masse de la poulie, 49 fois plus

faible que la vitesse qu'acquerrait la masse m tombant seule et librement dans le même temps. La vitesse de la masse m ainsi ralentie par sa liaison avec le système des masses pp' , devient donc facile à mesurer.

Si nous plaçons le long de la ligne verticale parcourue par pm une échelle divisée en centimètres, qu'au zéro de cette échelle nous fixions un plan mobile c qui supporte la double masse pm ; qu'au-dessous, à 10 centi. de c , nous en placions un autre d ; qu'enfin, à un moment donné,

nous enlevions brusquement le support c , et abandonnions ainsi à elle-même la masse pm , elle viendra juste, au bout d'une seconde, frapper le support d . Si celui ci est situé à 40 centi. du premier, ce n'est qu'au bout de 2" que le choc aura lieu, au bout de 3" si la distance est de 90 centi...., ce qui vérifie la loi des distances.

La démonstration de la loi des vitesses se fait d'une manière analogue; il suffit de remplacer le plateau d par un anneau f assez large pour laisser passer la masse p , mais assez étroit pour arrêter la masse m , et de fixer le plateau d au-dessous de f . f étant à 10^c de c , d à 30^c de c et à 20^c de f , une seconde après que le 1^{er} support c a été enlevé, la masse m est retenue par l'anneau f , et une seconde encore après, le mobile p , animé d'une vitesse devenue uniforme, vient frapper contre le support d . La vitesse, au bout d'une seconde, est donc égale à 20^{cm}. On la trouverait égale à 40^{cm}, au bout de 2 secondes, variable, enfin, suivant la loi citée plus haut.

La vitesse 9^m,8088, que la pesanteur imprime à un mobile au bout d'une seconde de chute, sert de mesure à l'intensité de cette force; elle est représentée en physique par la lettre g , et a été déterminée à l'aide du pendule, § 61.

CHAPITRE II.

PENDULE.

Direction
de la pesanteur.

55. Si la terre était homogène, sphérique et en repos, la direction de la pesanteur passerait rigoureusement par le centre de la terre; mais aucune de ces conditions n'étant exactement remplie, il en résulte, dans cette direction,

Fig. 21.



Fil à plomb.

Verticale.

une déviation que l'expérience nous apprend, toutefois, à considérer comme très-faible. Quoiqu'il en soit, la ligne parcourue par un corps tombant librement et sous la seule action de la pesanteur, est, en chaque lieu, verticale et perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles; elle est tracée par le fil à plomb, *fig. 21.*

Pendule.

56. La verticale est, en effet, la seule position d'équilibre du fil à plomb; quand on l'en écarte, il y revient en exécutant autour d'elle une série d'oscillations qui serait indéfinie sans la résistance de l'air et les frottements. Galilée, très-jeune encore, se trouvant dans la cathédrale de Pise, fut frappé de la régularité de ces balancements d'une lampe suspendue à la voûte, et cette observation d'un enfant devint la source des plus belles découvertes. Tout corps oscillant ainsi autour de sa verticale, constitue ce que l'on appelle en physique un pendule; mais, pour étudier les lois de ce genre de mouvement, il faut simplifier l'appareil dans lequel on l'observe. Le pendule le plus simple serait composé d'un point matériel suspendu par un fil sans pesanteur. On approche autant que possible de cette abstraction mathématique en employant une petite

balle de plomb, de cuivre ou d'un autre métal pesant suspendu à un mince fil de soie.

57. En opérant de cette manière, on reconnaît que les oscillations du pendule sont *isochrones*, c'est-à-dire d'égale durée pour un même appareil, qu'elles sont même sensiblement indépendantes de leur *amplitude* ou de l'angle compris entre les positions du pendule dans ses écarts extrêmes.

Lois du pendule.

Le temps d'une oscillation est, au contraire, intimement lié à la longueur du pendule. Prenez trois pendules dont les longueurs soient égales à 0^m,1, 0^m,4, 1^m,6, faites-les osciller simultanément, et vous observerez que, tandis que le premier bat 4 oscillations, le second en bat 2 et le troisième une seule. Les durées d'une oscillation de ces trois pendules sont donc entre elles comme les nombres $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ et 1, ou bien comme les nombres 1, 2, 4, tandis que les longueurs des pendules sont comme les nombres 1×1, 2×2, 4×4, qui sont les carrés des premiers : ce que l'on exprime en disant que *la durée t des oscillations des pendules est proportionnelle à la racine carrée des longueurs l de ces pendules*. La pesanteur *g* exerce une influence tout aussi grande, mais inverse.

58. Ces lois se résument dans la formule suivante, qui peut servir de moyen mnémonique pour les retenir :

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

dans laquelle π exprime le rapport de la circonférence d'un cercle à son diamètre.

59. L'application la plus précieuse du pendule aux usages ordinaires de la vie, est l'emploi qu'on en fait comme régulateur de nos horloges, et qui est dû à Huyghens. Jusqu'à sa découverte, on était réduit, pour connaître la marche du temps, au mouvement du soleil,

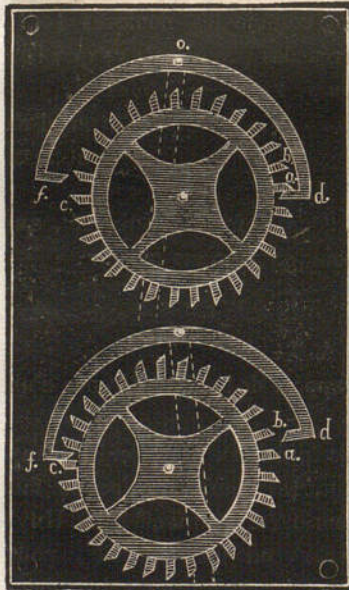
Application
du pendule
aux horloges.

ou à l'usage des bougies graduées, des sabliers, des clepsydres, etc.

On sait qu'une horloge est formée d'un système de roues dentées qui s'engrènent les unes dans les autres, de telle manière qu'elles tournent toutes dès que l'une d'elles est mise en mouvement. L'axe de l'une des roues fait mouvoir un système de deux aiguilles qui parcourent les divisions d'un cadran; l'axe d'une autre est entouré d'une corde à laquelle est suspendu un poids qui tend à le faire tourner sur lui-même, ou renferme, dans sa cavité, un ressort dont l'élasticité produit le même effet. Pour régler la marche de cet appareil, on y suspend un pendule ou balancier d'une longueur déterminée, entraînant, dans ses oscillations, une espèce de fourchette en fer appelée échappement.

Balancier.

Fig. 22.



La forme de cet échappement varie à l'infini; un seul exemple suffira pour en faire comprendre le rôle. La première partie de notre *fig. 22* représente le pendule dans son écart à gauche; la dent *a* de la roue appuie sur le crochet *d*. Lorsque le balancier reviendra vers la droite, entraînant avec lui l'échappement, le crochet *d* s'éloignera de la dent *a*, qui, sollicitée par la pression transmise jusqu'à elle du poids ou du ressort qui fait marcher l'horloge, glissera

le long du plan incliné que présente la pièce *d*, et donnera une petite impulsion à l'échappement et au pendule, dans le sens du mouvement de celui-ci, de manière à neutraliser l'influence de la résistance de l'air et des autres frottements. Pendant ce temps, le crochet *f* s'engagera entre les deux dents *c* et *g*, et arrêtera la première *c*. Nous serons alors dans les conditions de la *fig. 22*, 2^{me} partie. Pendant le retour du balancier vers sa position primitive, le crochet *d* s'engagera cette fois entre les dents *a* et *b*, et arrêtera la dent *b*. La roue dentée marchera donc d'une division à chaque oscillation complète du balancier; mais cette progression sera partagée en deux parties égales, séparées par des temps égaux. Dans les pendules ou horloges qui marquent la seconde, le balancier bat la seconde, la roue dentée a 30 dents, de sorte qu'elle fait un tour en 1' ou 60".

Les montres sont réglées d'une manière analogue; seulement, comme elles sont exposées à être placées dans toutes les situations, le balancier est remplacé par une roue qui porte le même nom, et qui, bien centrée, est en équilibre dans toutes ses positions autour de son axe. L'action de la pesanteur y est alors remplacée par celle d'un très-mince ressort que l'on peut facilement apercevoir au-dessous du mouvement des montres.

60. Le balancier, dans sa marche, obéit aux mêmes lois que le pendule simple; il oscille comme un pendule simple qui aurait une longueur déterminée par la forme du balancier. Il en résulte un procédé facile à suivre pour régler les horloges. Quand elles retardent, ce qui a généralement lieu en été, leur balancier est trop long: il faut le raccourcir; quand elles avancent, au contraire, leur balancier trop court doit être allongé. Dans les montres, le balancier est invariable; c'est alors sur le ressort qui règle son mouvement qu'il faut agir, ce qui revient à

Mouvement
des montres.

modifier l'intensité du terme g dans la formule $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ qui lui est applicable.

Mesure
de la pesanteur.

61. Cette formule mathématique, un peu abstraite, a fourni aux physiciens un moyen aussi simple que précis pour mesurer l'intensité de la pesanteur aux divers points du globe. On comprend, en effet, qu'en faisant osciller un même pendule d'une longueur constante et connue, la durée t d'une de ses oscillations mesurée en chaque lieu, permettra de tirer de cette formule la valeur de g correspondante, $g = \frac{\pi^2 l^2}{t^2}$.

Variation
de la pesanteur
à la surface
du globe.

C'est ainsi qu'on a trouvé que g est égal, à Paris, à 9,8088; que la pesanteur varie à la surface de la terre; qu'elle va en croissant de l'équateur vers les pôles; que, par suite, une pendule, réglée à Paris, retarderait plus au sud, et avancerait, au contraire, si elle était transportée aux pôles; que le balancier d'une même horloge doit, par conséquent, être plus court dans les premières régions que dans les secondes. Ainsi, le pendule qui bat la seconde, doit avoir, à l'Île-de-France, 991^{mm},7987, à New-York 993,1682, à Bordeaux 993,4530, à Paris 993,8666, à Londres 994,1232.

La cause de ces variations est double; elle réside dans l'aplatissement de la terre vers les pôles, qui fait qu'en ces lieux la surface de la terre est plus rapprochée de son centre que dans les régions équatoriales, et dans le mouvement de rotation de la terre sur elle-même, qui fait qu'une portion de la pesanteur, d'autant plus grande qu'on est plus voisin de l'équateur, est employée à maintenir à la surface de la terre les corps qui, sans elle, s'en éloigneraient d'un mouvement centrifuge, et que

le reste seulement en est employé à presser ces corps contre cette surface.

62. Le pendule peut servir également à démontrer d'une manière plus précise le fait énoncé § 51, que la pesanteur agit de la même manière sur tous les corps. Quelle que soit la substance dont cet instrument est formé, s'il a même forme et même longueur, il oscillera toujours de la même manière; la durée de ses oscillations restera constante. La valeur de g n'est donc point altérée par ce changement de nature.

CHAPITRE III.

ÉQUILIBRE DES CORPS PESANTS SOLIDES ET FLUIDES.

Équilibre des solides.

63. La liaison qui existe entre les divers points matériels d'un solide et qui le caractérise, nous autorise à supposer qu'on supprime toutes les petites forces distribuées sur ces points, et qu'on les remplace par la force unique égale à leur somme, le poids du corps. Cette force passera par un point constant pour un même solide, le *centre de gravité*, ainsi nommé parce qu'il est le point où tous les poids élémentaires peuvent être transportés et superposés sans rien changer aux conditions d'équilibre du corps.

Si donc ce point est directement soutenu ou fixé, le corps sera et restera en équilibre, de quelque manière qu'on le fasse tourner sur lui-même: c'est ce qui arrive pour une poulie bien ronde suspendue par son axe. Mais si le point fixe est en dehors du centre de gravité, il n'y a plus qu'une seule position d'équilibre possible: il faut que la verticale qui passe par le point fixe passe aussi par le centre de gravité du corps. C'est sur ce principe qu'est fondé l'emploi du fil à plomb, *fig. 23.*

Centre
de gravité.

Conditions
d'équilibre
des solides,

suspendus
par un de leurs
points,

reposant
sur un obstacle.

Fig. 23.



Lorsque le corps, au lieu d'être suspendu par un de ses points, repose sur un autre corps, les conditions d'équilibre sont analogues. Si le point d'appui est unique, il doit encore se trouver sur la verticale qui passe par le point fixe. Dans le cas contraire, il suffit que cette verticale rencontre la surface sur laquelle repose le corps, dans la portion polygonale comprise entre les lignes qui joignent les divers points d'appui

Fig. 24.

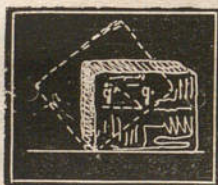
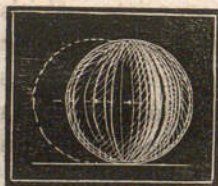
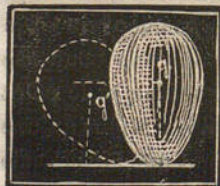


Fig. 25.



même *indifférent*. C'est le cas d'une sphère placée sur un plan horizontal, *fig. 25*.

Fig. 26.



L'équilibre serait *instable* si le centre de gravité descendait au contraire, car le corps, au lieu de revenir à sa position première, s'en éloignerait de plus en plus, comme un œuf que l'on voudrait faire tenir sur sa pointe. Sur le gros bout, l'entreprise serait moins difficile; il suffirait, pour y parvenir, de prendre un œuf un peu vieux, de l'agiter fortement pour détacher le vi-

tellus ou jaune des liens qui le tiennent suspendu au milieu de l'albumen.

64. Ces principes sont naturellement mis en pratique par les animaux et par l'homme pendant la marche ou la station. Pendant la station, la verticale du centre de gravité du corps doit tomber sur un des points de la base d'appui, et les diverses positions que l'on peut lui faire prendre, sans tomber, sont limitées par cette condition : elles sont d'autant plus restreintes que cette base est moins étendue. Dans la marche, le centre de gravité est porté un peu en avant ; mais aussi la base d'appui est sans cesse déplacée dans le même sens. Cette position du centre de gravité, incompatible avec l'équilibre au repos, aide, au contraire, à la progression ; aussi sa déviation est-elle d'autant plus grande que la course est plus rapide. Réciproquement, pour rattraper l'équilibre perdu, il faut se déplacer dans le sens de l'écart où il a été porté, et d'autant plus vite que cet écart a été plus grand.

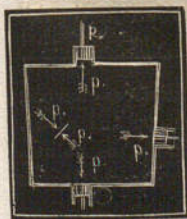
Station.

Marche.

Équilibre des fluides.

65. Les conditions d'équilibre des fluides diffèrent à quelques égards de celles des solides. Il résulte, en effet, de la mobilité observée dans les premiers, que *chaque particule doit y être isolément en équilibre sous l'influence des forces*

Fig. 27.



extérieures qui la sollicitent, condition que les liaisons moléculaires rendaient superflue dans les solides. Il en résulte encore que lorsqu'une pression p est exercée en un point quelconque d'un fluide, *cette pression se transmet intégralement dans tous les sens et dans toute l'étendue de la*

Principe de l'équilibre moléculaire.

Principe de l'égalité transmission des pressions.

masse fluide, où elle vient combiner son action à celle des forces locales. Elle y est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à l'étendue de la surface sur laquelle elle s'exerce, devenant 2, 3 ... fois plus grande quand cette surface est 2, 3 ... fois plus grande elle-même.

66. Parmi les fluides, nous l'avons vu, les uns, comme les gaz et les vapeurs, n'ont point de surface terminale propre : les conditions d'équilibre auxquelles ils sont soumis dérivent toutes des deux principes énoncés précédemment. Les autres, au contraire, ont un volume déterminé; une portion de leur surface reste en général libre, en dehors de l'action du vase. Nous aurons donc à étendre les conséquences de ces deux principes et à la masse liquide et à la surface qui la termine.

Équilibre des liquides, conditions relatives aux surfaces.

Conditions
d'équilibre

des surfaces
continues,

67. D'une manière générale, la surface d'un liquide en équilibre doit être en chacun de ses points normale (1) à la résultante des forces qui la sollicitent en ce point. Si donc un liquide est soumis à l'action seule de la pesanteur, sa surface, perpendiculaire en chacun de ses points à la verticale, formera un *plan* parfaitement horizontal, tant qu'elle aura assez peu d'étendue pour que la direction de la pesanteur puisse y être partout considérée comme parallèle à elle-même. La surface des lacs est plane et horizontale.

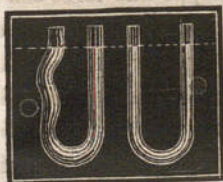
Quand l'action des parois du vase qui contient le liquide

(1) Le mot normal remplace, pour les lignes ou surfaces courbes, le mot perpendiculaire réservé aux lignes droites ou aux plans. Une ligne est dite normale à une surface en un de ses points, quand elle est perpendiculaire au plan tangent à cette surface en ce point.

intervient d'une manière sensible, cette horizontalité est détruite; l'eau, le vin... se relèvent un peu le long de ces parois; le mercure s'infléchit en sens contraire: ces effets seront étudiés avec les autres phénomènes capillaires. Lorsqu'on fait tourner de l'eau sur elle-même dans un vase, la force centrifuge développée dans ce mouvement modifie encore la surface qui se creuse au centre pour s'élever vers les bords.

68. L'horizontalité de la surface d'un liquide en repos est indépendante de la forme du vase; elle a lieu également que cette surface soit continue ou qu'elle soit interrompue et formée de surfaces partielles appartenant à la

Fig. 28.

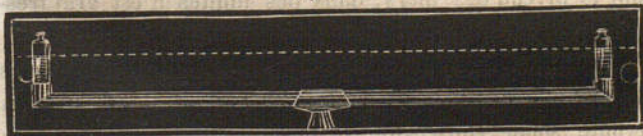


même masse liquide. Prenez des tubes de verre, recourbez-les à la lampe d'une manière quelconque, et versez-y de l'eau, du vin, de l'huile...; dans quelque position que vous les placiez, le liquide s'élèvera toujours au même niveau dans les deux branches. L'équi-

libre ne pourra exister dans toute la masse que quand cette condition sera réalisée. L'écoulement des eaux dans les fontaines artificielles ou naturelles, les puits artésiens, ne sont que des résultats de la tendance des liquides à se mettre de niveau dans toute leur étendue.

C'est sur ce fait aussi qu'est fondé l'emploi du niveau

Fig. 29.



d'eau, composé, comme on sait, d'un long tube creux recourbé à angle droit à ses deux extrémités, où il est terminé par deux tubes de verre qui permettent d'aperce-

des surfaces discontinues.

Vases communicants.

Niveau d'eau.

voir les extrémités des colonnes du liquide qui garnit l'appareil. La ligne qui passe par les sommets de ces deux colonnes est parfaitement horizontale.

Niveau
des mers.

69. Si la mer n'était soumise qu'à l'action de la pesanteur, si de plus la surface de la terre était bien unie et sphérique, en sorte que la direction de la pesanteur en chacun de ses points passât rigoureusement par le centre de la terre, la surface des mers, en chaque point perpendiculaire à cette direction, serait elle-même rigoureusement sphérique. Mais la terre tourne sur elle-même en 24 heures; chaque point de sa surface décrit, dans un plan parallèle à l'équateur, un cercle dont le rayon va en décroissant de l'équateur au pôle; et ce mouvement circulaire développe une force centrifuge toujours perpendiculaire à l'axe de rotation de la terre, et décroissant aussi de l'équateur au pôle. C'est l'action combinée de cette force centrifuge et de la pesanteur qui détermine la forme de la surface des mers, en chacun de ses points normale à leur résultante. Cette surface n'est donc pas exactement sphérique; elle est aplatie vers les pôles et renflée à l'équateur, ainsi que des expériences précises l'ont démontré. Cet aplatissement est de $\frac{1}{311,7}$. Et tandis que la distance du pôle au centre est de 3,178,107 mètres, la distance du centre à l'équateur est de 3,188,303 mètres. Les montagnes, quelque petites qu'elles soient en présence des dimensions colossales de la terre, influent elles-mêmes sur le niveau des mers, dans des limites il est vrai très-restreintes.

Aplatissement
de la terre.

70. On se demande quelquefois ce qu'il adviendrait des mers si le mouvement de la terre venait à cesser. Si la croûte solide conservait sa forme, les régions polaires seraient submergées, et les régions équatoriales mises à sec. Mais les masses fluides qui forment le noyau terrestre obéissent, elles aussi, à la force centrifuge; et, celle-ci ces-

sant, elles reflueraient en partie vers les pôles, en sorte que la surface solide éprouverait, partiellement du moins, la même déformation que la surface liquide. Nul besoin d'ailleurs d'ajouter que cette hypothèse n'est qu'une conception chimérique de notre esprit.

71. En dehors des agitations incessantes produites par les vents à la surface des mers, le niveau des grandes mers est périodiquement variable; il s'y manifeste, deux fois par jour, des flux et des reflux. Ce phénomène des marées tient à ce que l'attraction du soleil et surtout de la lune vient compliquer encore les conditions d'équilibre des eaux à la surface du globe. La lune tend à élever le niveau des mers aux deux extrémités du diamètre terrestre dans la direction duquel elle se trouve; et, à cause du mouvement de rotation de la terre, ces deux élévations en font le tour en $24^{\text{h}}49'$, temps employé par la lune pour revenir au même point. Le phénomène des marées est d'autant plus sensible qu'il se produit dans des mers plus étendues; il est presque nul dans la Méditerranée, plus grand dans la Manche, qui se trouve largement en communication avec l'Océan, que dans l'Océan lui-même. Il acquiert surtout une grande énergie, lorsque le soleil et la lune agissent de concert, c'est-à-dire aux nouvelles et aux pleines lunes.

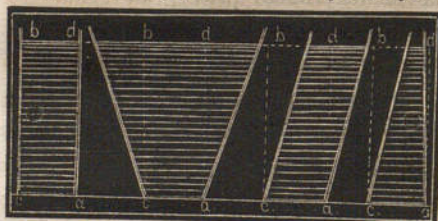
Marées.

71
 1844
 1845

CHAPITRE IV.

PRESSIONS DANS LES LIQUIDES.

72. Considérons une colonne liquide cylindrique verticale, *fig. 30*, soumise à l'action seule de la pesanteur ; sa surface terminale sera horizontale, et on pourra imaginer qu'elle est partagée en couches horizontales aussi, et d'une épaisseur constante très-petite. Chaque couche exercera une pression égale à son poids sur la couche qui la supporte directement, et cette pression se transmettra à toutes les couches sous-jacentes, en vertu du deuxième principe du § 63. Ces pressions élémentaires s'ajoutant successivement l'une à l'autre, la pression totale exercée sur une couche horizontale sera égale à la somme des pressions exercées par les couches supérieures, et croîtra par conséquent proportionnellement à la profondeur de cette couche au-des-

*Fig. 30.**Fig. 31.**Fig. 32. Fig. 33.*

Pressions
sur le fond
des vases.

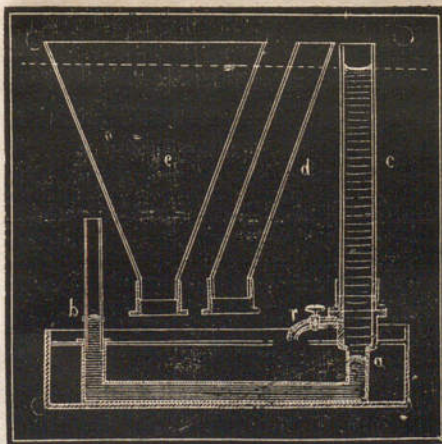
sous de la surface terminale du liquide. De plus, cette pression sera constante, uniforme sur toute la surface de cette même couche, proportionnelle à son étendue, égale enfin au poids de la colonne liquide qui la surmonte. La couche considérée peut être remplacée par le fond du vase lui-même, sans que le résultat en soit modifié.

L'énoncé qui précède n'est point limité aux vases cylindriques : nous devons l'étendre à toute masse liquide, quelle qu'en soit la forme. Dans toute espèce de vase contenant

un liquide, la pression exercée en un point du fond supposé horizontal, ou d'une surface de niveau quelconque, est constante, uniforme dans toute l'étendue de la surface considérée, et ne dépend, pour un même liquide, que de la hauteur de celui-ci; elle est égale, enfin, au poids d'une colonne liquide qui aurait pour base la couche considérée, et pour hauteur la profondeur de cette couche au-dessous de la surface liquide. Cette pression peut donc être incomparablement plus considérable que le poids du liquide qui la produit. Si, par exemple, nous adaptons à un tonneau plein d'eau un tube long, mais étroit, quelques centaines de grammes d'eau versées dans le tube pourront faire éclater le tonneau, quelle qu'en soit la résistance.

73. On peut donner de cette loi des pressions une démonstration expérimentale à l'aide de l'appareil de Haldat. Cet

Fig. 34.



peuvent se visser des vases *c*, *d*, *e* de diverses formes et grandeurs. Du mercure est versé dans le tube recourbé; l'un des vases, *c*, est vissé sur la branche *a*, et rempli

appareil se compose d'un fort tube de verre horizontal recourbé à angle droit à ses deux extrémités, en deux branches verticales *a* et *b*, dont l'une, *b*, est ouverte librement à l'air, tandis que l'autre est mastiquée dans une pièce de cuivre sur laquelle

Appareil de Haldat.

d'eau jusqu'en n . Sous l'influence de la pression exercée par cette eau, le mercure s'est déplacé; de ses deux surfaces primitivement au même niveau, l'une a s'est abaissée, l'autre b s'est élevée. Or, si on enlève le vase c , qu'on le remplace par le vase d , le vase e ou tout autre, l'eau montant encore en n , le mercure sera toujours exactement repoussé au même point b . Sans connaître la relation qui existe entre le déplacement du mercure et la présence de l'eau qui le produit, nous pouvons d'hors et déjà conclure de la constance du déplacement du mercure à l'égalité des pressions exercées par l'eau sur la surface a du métal.

Pressions
dans
la masse fluide.

Hydrogène
saturé

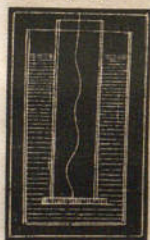


Fig. 35.

74. Comme il n'y a point d'action sans réaction, une couche pressée de haut en bas pressera à son tour de bas en haut avec une égale force la couche en contact supérieurement avec elle. Aussi, lorsqu'on introduit dans un liquide un tube fermé à sa partie inférieure par un disque mobile, on voit le disque pressé par le liquide rester accolé au tube, et ne s'en détacher que lorsque de l'eau versée en quantité suffisante dans ce tube vient contre-balancer la pression extérieure.

Au reste, l'équilibre ne peut exister dans un liquide qu'autant que chaque molécule, dont nous négligeons ici la pesanteur, est pressée également dans tous les sens. Les parois latérales du vase seront donc pressées elles-mêmes, quelque direction qu'elles aient, comme si elles étaient horizontales.

Pressions
latérales.

75. L'existence des pressions latérales a conduit à d'importantes applications dans l'industrie. Dans un vase rempli d'eau, les pressions exercées contre les parois latérales s'équilibrent mutuellement, la pression exercée en un point

étant contre-balancée par la pression exercée sur le point situé vis-à-vis au même niveau; mais si on vient à enlever celle-ci en perceant la paroi d'une ouverture correspondante, la première pression conservant toute son action, tendra à entraîner le vase qui, en effet, marchera dans le sens de cette

Fig. 36.



force s'il n'est arrêté par de trop grands frottements. Cette double condition est remplie dans le tourniquet hydraulique, appareil qui peut donner une idée assez exacte des turbines. Il se compose d'un vase mobile autour d'un axe vertical, et terminé inférieurement par deux tubes horizontaux ouverts à leur extrémité où ils sont recourbés en forme de S. Lorsque cet appareil est rempli d'eau, on le voit,

dès que l'écoulement a lieu, prendre un mouvement de rotation en sens contraire. C'est un phénomène du même genre qui produit le recul des armes à feu, l'ascension des fusées, la rotation des soleils d'artifice, etc.

76. Ces mêmes pressions latérales peuvent donner l'explication d'un fait qui aura peut-être déjà frappé le lecteur. La pression exercée par le fond d'un vase sur son support est toujours égale au poids du vase augmenté du poids du liquide qu'il contient; la pression exercée, au contraire, sur le fond du vase par le liquide dépend beaucoup plus de la forme du vase que la masse du liquide lui-même; en sorte que, en dehors du poids du vase, la pression exercée par le fond est tantôt plus grande, tantôt plus petite que celle qui est exercée sur lui, et qu'il devrait transmettre intégralement à son support. Les pressions latérales donnent lieu à cette apparente contradiction, en tendant à soulever ou à abaisser les parois latérales du vase, suivant que celles-ci sont inclinées en dedans ou en dehors.

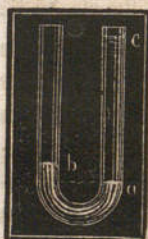
Tourniquet
hydraulique.

Paradoxe
hydrostatique.

77. Le principe d'uniformité de pression sur toute l'étendue d'une même couche de niveau se vérifie encore alors même que cette couche est discontinue, pourvu qu'elle n'embrasse qu'un seul et même liquide. Il n'en saurait plus être de même si le plan de niveau s'étendait à deux liquides de natures différentes.

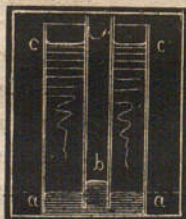
Équilibre
des liquides
hétérogènes
dans les vases
communicants.

Fig. 37.



Prenez un tube que vous recourberez deux fois à angle droit sur lui-même, et, le maintenant renversé, les branches ouvertes dirigées en haut, versez-y du mercure. Les deux surfaces du liquide s'élèveront à la même hauteur. Versez alors de l'eau dans une des branches; le mercure cèdera sous l'effort de cette pression nouvelle; sa surface libre *b* s'élèvera au-dessus de la surface *a* pressée par l'eau. Si maintenant par cette dernière on mène un plan horizontal, la pression en *a* devra être la même sur toute l'étendue du plan du niveau, et conséquemment la hauteur *ab* sera autant de fois supérieure à *ac*, que le mercure pèse de fois plus que l'eau sous le même volume. On dit que les hauteurs des deux colonnes *ab* et *ac* qui se font équilibre sont en raison inverse de leurs densités (1).

Fig. 38.



La forme des colonnes liquides qui se balancent n'influe pas sur l'exactitude de cette loi. Prenez un vase profond, versez-y du mercure, plongez dans ce liquide l'extrémité inférieure d'un tube ouvert à ses deux bouts, puis versez de l'eau dans le vase de manière qu'il n'en pénètre pas dans le tube; vous verrez,

(1) La densité d'un corps (chap. VI) se mesure par les poids de l'unité de volume de ce corps. La pression exercée par *a c* est égale au poids de cette colonne liquide ou à son volume, proportionnel ici à sa hauteur, multiplié par sa densité, etc.

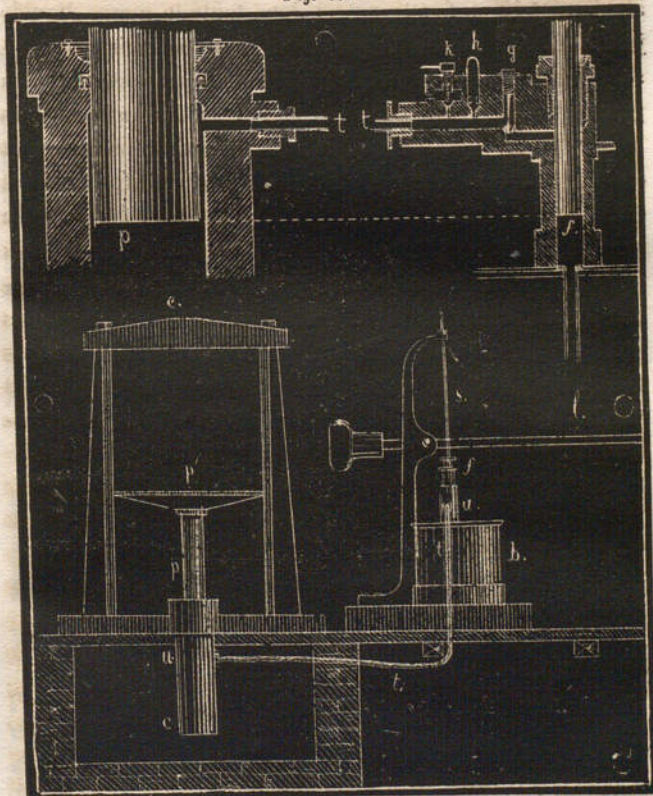
sous l'influence de la pression exercée par l'eau, le mercure monter dans le tube, au-dessus du niveau $a a'$ où il descend à l'extérieur, à une hauteur ab qui est à la hauteur ac de l'eau ajoutée, dans le rapport inverse des densités des deux liquides.

Cette expérience bien comprise nous rendra très-facile l'intelligence du baromètre.

78. Les conditions d'équilibre des liquides dans les vases

Fig. 39.

Presse
hydraulique.



communicants nous fournissent une explication facile du jeu d'un instrument qui joue dans l'industrie un rôle im-

portant, la presse hydraulique dont nous donnons *fig. 39* le dessin théorique et la perspective. Cet instrument se compose essentiellement de deux cylindres en fonte à parois très-épaisses, mis en communication l'un avec l'autre au moyen d'un tube latéral *t* et dans lesquels se meuvent deux pistons qui les ferment exactement. Le premier cylindre *af* et son piston *f* font l'office de pompe foulante (chap. VII), et servent à comprimer de l'eau dans l'appareil. La pression ainsi exercée en *f* se transmet dans toute la masse liquide jusqu'au gros piston *p* qui la transporte au plateau *p'* sur lequel repose le corps qu'il s'agit de pressurer. La pompe foulante est mise en mouvement au moyen d'un levier à l'extrémité duquel agissent plusieurs hommes, et chaque homme, par son intermédiaire, peut aisément exercer sur le piston *f* une pression de 300^k . La base du gros piston est en général cent fois plus grande que celle du petit. En représentant celle-ci par l'unité, la base du premier sera donc égale à 100 unités sur chacune desquelles une pression de 300^k sera transmise par l'eau dont nous négligeons le poids. C'est donc une force de $300^k \times 100$ ou de $30,000^k$ par homme qui tend à soulever le plateau *p'*.

CHAPITRE V.

ÉQUILIBRE DES GAZ.

79. Tous les gaz pèsent comme les solides et les liquides ; mais comme leur masse est extrêmement faible, tant qu'on ne les considère que sous un petit volume, on peut, sans erreur appréciable, négliger leur poids. Dans ce cas, leur force élastique ou la pression qui la développe et lui sert de mesure est uniforme, constante dans toute leur étendue. Le principe de l'égale transmission des pressions n'étant plus masqué par l'action presque nulle de la pesanteur, y apparaît dans toute sa rigueur.

Il n'en est plus ainsi lorsque l'on considère une grande masse gazeuse comme celle qui enveloppe la terre et en forme l'atmosphère. L'atmosphère, dont la profondeur est au moins de 15 à 16 lieues de profondeur, exerce, en effet, à la surface de la terre, des pressions considérables dont nous étudierons successivement les principaux effets.

Pression
atmosphérique.

80. Prenons un cylindre fermé à la partie supérieure par une vessie, et dressé à l'extrémité inférieure par laquelle il repose sur la

Fig. 40.



platine d'une machine pneumatique. En faisant le vide dans l'intérieur du cylindre, nous verrons, à mesure que l'air en sera soutiré, la vessie s'infléchir et se tendre sous la pression exercée

Crève vessie.

par l'atmosphère, puis éclater avec grand bruit spontanément ou sous l'influence du moindre choc. La pression atmosphérique n'est pas créée dans cette expérience, mais l'élasticité de l'air intérieur qui la contre-balançait se trou-

vant détruite par la disparition de cet air , elle apparaît avec toute son énergie.

Un effet semblable peut être produit avec les hémisphères de Magdebourg. Ce sont deux calottes sphériques s'adaptant exactement l'une sur l'autre , et dont

Hémisphères
de Magdebourg.

Fig. 41.



Fig. 42.



l'une est munie d'un robinet fermant bien à l'aide duquel elle peut être vissée sur le conduit de la machine pneumatique. La cavité intérieure de cette sphère creuse étant mise en communication libre avec l'atmosphère , l'air qu'elle renferme se met en équilibre de tension avec l'air extérieur , et les deux calottes , pressées également en dedans et en dehors , peuvent être séparées sans obstacle.

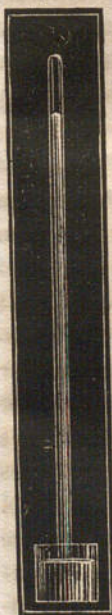
Mais si on fait le vide dans l'appareil , la pression intérieure disparaît , et la pression extérieure , privée de son contre-poids , fixe les deux hémisphères l'un à l'autre avec une force qu'un seul homme ne saurait vaincre. Car , si la base des hémisphères est égale à un décimètre carré seulement , cette force dépasse 100 kilogrammes.

81. Les principes d'hydrostatique exposés dans le chapitre précédent nous fournissent un moyen simple et précis de mesurer la pression atmosphérique. Prenons deux vases , l'un contenant du mercure , l'autre de l'eau , par exemple , et plongeons verticalement un tube de verre dans chacun d'eux. Les liquides , également pressés en dedans et en dehors des tubes , conserveront ici et là le même niveau ; mais si , au moyen de la machine pneumatique , nous enlevons par leur partie su-

périeure l'air renfermé dans les tubes, nous verrons, à mesure que l'opération marchera, les liquides s'y élever graduellement et inégalement, jusqu'à ce que chaque colonne soulevée exerce sur sa base une pression qui puisse compenser la diminution de pression due à la soustraction de l'air.

Si les tubes sont suffisamment élevés, si on y opère un vide parfait au-dessus des colonnes liquides, on pourra donc prendre pour mesure de la pression atmosphérique la pression de ces colonnes qui lui font équilibre. On trouverait ainsi que le mercure s'élève à une hauteur de 760^{mm} environ, et l'eau à une hauteur de 10^m,345, nombres qui sont en raison inverse des densités des liquides employés.

Fig. 43. Aussi le premier liquide est-il seul employé à la mesure des pressions atmosphériques.



82. Les meilleures machines ne font jamais le vide d'une manière parfaite; mais on peut facilement remédier à cet inconvénient. Prenez un tube long de 1 mètre et fermé par un bout; remplissez-le de mercure que vous ferez bouillir partie par partie depuis le bas jusqu'en haut, afin d'en chasser toute trace d'air et d'humidité. Ce tube étant bien exactement rempli, fermez-en l'extrémité avec le doigt, et renversez-le dans une cuvette contenant du mercure. Dès que vous aurez ôté votre doigt, la colonne de mercure descendra d'une certaine quantité, et se maintiendra à une hauteur au-dessus du mercure de la cuvette, telle qu'elle fasse à elle seule équilibre à la pression de l'air extérieur; car le vide au-dessus de cette colonne dans le tube sera aussi parfait qu'il nous est possible de l'obtenir. Vous aurez construit un *baromètre à cuvette*.

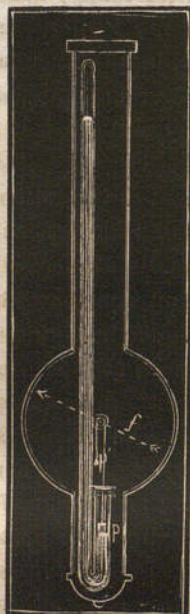
Mesure
de la pression
atmosphérique.

Baromètre
à cuvette.

Fig. 44.

Baromètre
à siphon.

Fig. 45.

Baromètre
à cadran.

83. Au lieu de faire plonger notre tube dans une cuvette remplie de mercure, nous aurions pu le recourber sur lui-même à sa partie inférieure, et recevoir, dans la branche ouverte ainsi formée, le mercure qui proviendrait de la descente de la colonne liquide contenue dans la grande branche. Le mercure s'arrêterait encore à un point tel que la pression de la colonne suspendue au-dessus du niveau du mercure dans la courte branche équilibrât la pression atmosphérique en ce point. Nous aurions alors un baromètre à siphon, fig. 44.

Le baromètre à cadran, fig. 45, n'est autre chose qu'un baromètre à siphon. La flèche *f* mobile autour du cadran porte sur son axe une poulie sur la gorge de laquelle s'enroule un fil de soie. Aux deux extrémités de ce fil sont suspendus deux poids inégaux *q*, *q'*; le plus lourd vient reposer sur le mercure dont il suit les mouvements pour les transmettre à la poulie et à l'aiguille.

84. Les divers baromètres, fig. 43, 44, 45, que nous venons d'énumérer et de décrire sommairement, sont le plus généralement appliqués aux usages ordinaires de la vie. Leurs indications présentent avec l'état de l'atmosphère une liaison réelle bien qu'assez peu précise dans son expression. Aussi trouve-t-on, dans la région où se tient ordi-

nairement le sommet de la colonne de mercure, outre les nombres qui en indiquent la hauteur, divers états atmosphériques, tempête, pluie, variable, beau, beau fixe. Nous reviendrons sur ce sujet dans la météorologie.

Le baromètre sert aussi à des usages plus scientifiques.

85. La suspension de la colonne de mercure dans le tube barométrique étant due à la pression de l'air, on comprend que la hauteur de cette colonne doit diminuer de plus en plus à mesure qu'on s'élève plus haut dans l'atmosphère ou à l'aide des ballons ou par le moyen des montagnes. La pression atmosphérique, en effet, va en diminuant, dans ces circonstances, de tout le poids des couches d'air qu'on laisse au-dessous de soi. Près du niveau des plaines, une ascension de 10 mètres entraîne une diminution de 1^{mm} environ dans la hauteur du baromètre, le mercure étant à peu près 10000 fois plus dense que l'air.

On soupçonne, d'après cela, comment le baromètre peut servir à mesurer les hauteurs des montagnes. Que deux observateurs, munis chacun d'un baromètre, se placent l'un au sommet, l'autre au pied d'une montagne, et qu'ils observent simultanément le baromètre : la différence de hauteur des deux colonnes mercurielles observées sera d'autant plus grande que la différence de hauteur des deux stations sera plus grande elle-même. Ce moyen est, en effet, mis journellement en usage et avec succès. Une formule, trop compliquée pour que nous la donnions ici, sert à déduire cette dernière quantité de la première. Mais, dans ce genre d'opérations, il est indispensable de se servir de baromètres plus précis et plus facilement transportables que ceux dont nous avons déjà parlé. Les baromètres de Gay-Lussac et de Fortin ou de Hernz satisfont pleinement à ces exigences.

Variations
du baromètre
avec la hauteur.

Mesure
des hauteurs
par le baromètre.

86. Le premier est un baromètre à siphon dont la courte branche, fermée aussi à sa partie supérieure, est percée latéralement d'une très-petite ouverture qui donne accès

Fig. 46.

Baromètre
de Gay-Lussac.

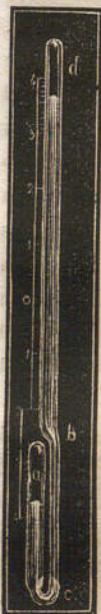


Fig. 47.



Baromètre
de Fortin.

à l'air en s'opposant cependant à la sortie du mercure. Cet instrument est renfermé dans un étui en cuivre percé de deux rainures au travers desquelles on peut regarder les extrémités des deux colonnes. Sur cet étui, à partir d'un point *o* situé vers son milieu, sont tracées deux échelles, l'une ascendante, l'autre descendante, qui permettent d'évaluer les distances à ce point des extrémités des deux colonnes. La somme de ces distances donne la hauteur totale du baromètre.

Le baromètre de Fortin ou de Hertz est un baromètre à cuvette. Le tube barométrique est renfermé également dans un étui en cuivre gradué ; mais le zéro ou point de départ de cette échelle correspond à l'extrémité d'une pointe d'ivoire *p* que doit affleurer le mercure de la cuvette à chaque observation que l'on fait. A cet effet, le fond de la cuvette est fermé par une peau *l* que l'on peut soulever ou abaisser à l'aide d'une vis *s*.

C'est aussi à l'aide de cet instrument précis que l'on étudie scientifiquement les variations barométriques.

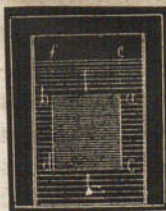
CHAPITRE VI.

ÉQUILIBRE DES CORPS PLONGÉS DANS LES FLUIDES; MESURE
DES DENSITÉS.

87. Journallement il nous arrive de voir certains corps marcher à l'encontre des lois de la pesanteur. Le liége, le bois, remontent lorsqu'ils sont plongés dans l'eau; le fer, quand il a été introduit au milieu d'une masse de mercure; les nuages restent suspendus sur nos têtes comme s'ils étaient soustraits à l'action de la pesanteur; des corps d'un grand poids, comme les ballons, s'élèvent dans l'air et semblent fuir le sol qui les attire. Tous ces singuliers phénomènes sont la conséquence naturelle des pressions développées au sein des fluides; tous ont leur explication dans le principe d'Archimède depuis long-temps célèbre. Suspendez au milieu d'un vase vide d'eau, à l'un des bassins d'une balance, un corps, quelque lourd qu'il soit, et faites-lui équilibre au moyen de poids placés dans l'autre bassin. Si vous versez de l'eau dans le vase, de manière à baigner le corps, l'équilibre sera rompu, et, pour le rétablir, il faudra ôter une portion des poids qui avaient primitivement servi à l'obtenir, comme si le corps était devenu plus léger.

Poussée
des fluides.

Fig. 48.



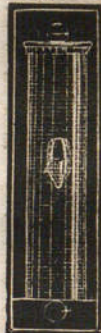
88. Examinons ce qui se produit alors. Un cube est plongé dans de l'eau, de manière que sa base soit horizontale. Les pressions latérales, égales et contraires, se détruisent deux à deux. La couche horizontale $a b$ de niveau avec la base supérieure du cube est pressée verticalement avec une force proportionnelle à la hauteur

du liquide au-dessus : cette base ab supporte le poids d'une colonne liquide dont la base est ab et la hauteur ae . La couche horizontale dc est pressée avec une force proportionnelle aussi à la hauteur du liquide situé au-dessus, et réagit avec une force égale. La base cd est donc pressée verticalement de bas en haut avec une force égale au poids d'une colonne liquide dont la base est $cd=ab$, et dont la hauteur est ce . Ces deux pressions contraires, mais inégales, ont une résultante égale à leur différence, et le cube est finalement poussé de bas en haut avec une force égale au poids d'une masse cubique liquide dont la base est cd , et la hauteur $ce - ae = ca$, masse dont le volume est égal au volume du corps lui-même.

Principe
d'Archimède.

89. *Tout corps plongé dans un fluide quelconque perd ainsi de son poids apparent une quantité égale au poids de la masse du fluide dont il tient la place.* Tel est l'énoncé du principe d'Archimède. Le poids du corps est-il supérieur au poids du fluide déplacé, ce corps tombera au milieu du fluide :

Fig. 49.



Ludion.

le contraire a-t-il lieu, la force de poussée étant supérieure au poids du corps, celui-ci montera comme s'il fuyait la terre. Ces divers états peuvent être réalisés successivement à l'aide du ludion. Si le corps est dans l'air, il s'élèvera ainsi jusqu'à une couche où la densité de l'air, décroissant avec la pression qu'il supporte, devienne égale à la densité du corps, et que les forces ascendante et descendante deviennent égales ; s'il est plongé dans un liquide, il en atteindra la surface, la surpassera en partie, et flottera dans des conditions telles que le poids du liquide qu'il déplace soit égal à son propre poids.

Démonstration
expérimentale
du principe
d'Archimède.

90. On peut donner du principe d'Archimède une démonstration purement expérimentale. L'appareil employé à

Fig. 50.

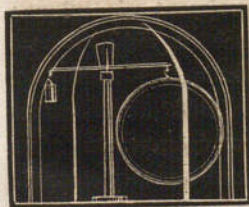


cet usage se compose d'un cylindre creux et d'un cylindre plein dont le volume est égal à la capacité du premier. Ces deux cylindres sont suspendus à l'un des bassins d'une balance, le second au-dessous du premier, au milieu d'un vase vide d'eau, et on leur fait équilibre à l'aide de poids placés

dans l'autre bassin. Si on verse de l'eau dans le vase, de manière à faire baigner dans le liquide seulement le cylindre plein, l'équilibre est rompu; mais pour le rétablir, il suffit de remplir d'eau le cylindre creux, en sorte que l'on compense exactement la perte de poids apparent subie par le cylindre par suite de son immersion dans l'eau, en surchargeant le plateau qui le supporte du poids d'un volume d'eau égal au volume du corps immergé.

91. Les corps plongés dans l'air éprouvent une diminu-

Fig. 51.



tion analogue dans leur poids apparent. Suspensions aux deux extrémités d'une petite balance bien sensible d'une part un corps léger mais volumineux, de l'autre, un corps plus dense et d'un petit volume, de manière que l'équilibre soit établi dans l'air, et introduisons cet instrument sous la cloche de la machine pneumatique; à mesure que nous ferons le vide, l'air disparaîtra de la cloche et par suite toute force de poussée. Nous verrons en même temps le corps volumineux descendre sous l'action d'un excès de poids qui se trouvait neutralisé au sein de l'air.

Baroscope.

Ballons.

92. Les ballons, sur lesquels on paraît fonder tant d'espérances chimériques, sont encore, malgré leur énorme poids, plus légers que l'air qu'ils déplacent. Formés d'une enveloppe de taffetas recouvert d'un vernis imperméable au gaz, on les remplit ou d'hydrogène ou de gaz de l'éclairage plus pesant que l'hydrogène, et cependant plus léger que l'air. Un litre d'air pèse 1^g297; un litre d'hydrogène pèse seulement 00^g897. Le poids de l'hydrogène qui remplirait un ballon d'une capacité de 1,000^{mc}, serait donc seulement de 89^{kg}700. Le poids d'un égal volume d'air serait de 1297^{kg}; la force de poussée serait donc de 1107,3 employés à soulever le poids du ballon, de la nacelle, des cordes qui la soutiennent, des personnes qui la montent, et du lest dont elles sont munies. La puissance d'un ballon de pareille dimension serait évidemment beaucoup moindre si l'hydrogène était remplacé par du gaz de l'éclairage.

Les voyages aérostatiques ont acquis toutes les faveurs d'un public avide du merveilleux; sauf quelques rares exceptions, ceux qui ont été entrepris jusqu'à ce jour n'ont mérité qu'un intérêt de curiosité passagère, et il en sera probablement de même de ceux qui suivront désormais. Deux cependant ont une importance vraiment scientifique: l'un a été entrepris par M. Gay-Lussac en 1804, l'autre tout récemment par MM. Barral et Bixio. Ces intrépides observateurs se sont élevés environ à 7,000^m au-dessus du sol, et ont entrepris, dans ces hautes régions, une série d'observations dont nous aurons plus tard à rendre compte.

Mesure
des volumes.

93. La géométrie nous fournit les moyens d'évaluer le volume des corps; mais les circonstances dans lesquelles ses préceptes sont applicables, sont très-rarement réalisées dans la pratique, et il faut souvent avoir recours à d'autres voies. Le principe d'Archimède nous en fournit une aussi simple qu'infaillible.

On sait que l'unité de poids, le gramme, est égale au poids d'un centimètre cube d'eau distillée et à son maximum de densité ou à la température de 4°1. Autant de fois une masse d'eau, prise dans les conditions précédentes, pèsera de grammes, autant de fois son volume contiendra de centimètres cubes. Poids et volume sont donc représentés par les mêmes nombres. Voulons-nous dès lors connaître le volume d'un corps solide? pesons-le dans l'air, puis dans l'eau distillée à 4°1, la différence des poids fera connaître le poids du volume d'eau déplacée par ce corps, et par suite ce volume ou le volume du corps. Nous négligeons, il est vrai, la perte de poids apparente que le corps éprouve dans l'air, mais l'erreur qui en résulte ne peut être appréciée que dans des expériences d'une délicatesse extrême. Veut-on pareillement mesurer le volume d'un vase? on pèsera ce vase vide, puis plein d'eau distillée : la différence des poids donnera le poids de l'eau, et par suite son volume ou le volume du vase.

Volume
des corps solides.

Volume
des vases
et des liquides.

L'obligation même d'opérer sur de l'eau à 4°1 peut être évitée par la connaissance de la dilatation que ce liquide éprouve sous l'influence de la chaleur.

94. De là à la mesure des densités ou des poids spécifiques, il n'y a qu'un pas. Densité et poids spécifique sont des qualités des corps essentiellement distinctes, mais proportionnelles et représentées par les mêmes nombres relatifs; leurs déterminations rentrent l'une dans l'autre. Le poids spécifique d'un corps est le poids de l'unité de volume de ce corps. Si un corps dont le volume est V pèse P , l'unité de volume de ce corps pèsera P/V . Le poids spécifique d'un corps est donc aussi égal au poids du corps divisé par son volume. Le poids P se mesure par les ba-

Mesure
des poids
spécifiques.

lances; le volume V , comme nous l'avons dit dans le précédent §.

Densité
des solides.

95. Prenons quelques exemples. Nous voulons déterminer la densité d'un morceau de fer. Nous trouvons qu'il pèse dans l'air 27^g26. Nous le suspendons au-dessous du petit bassin de la balance hydrostatique, *fig.* 50; nous le faisons plonger dans l'eau, en plaçant au-dessous de ce bassin un vase rempli de ce liquide, et nous trouvons qu'il n'y pèse plus que 23^g76. Son volume est donc de $27,26 - 23,76 = 3,50$, et sa densité de $27,26 : 3,50 = 7,788$.

Densité
des liquides.

Fig. 52.



Pour un liquide, nous opérerons différemment. Nous prendrons un tube de verre de 1^m de diamètre; nous le fermerons à l'une de ses extrémités, et à une petite distance de l'autre extrémité nous l'étirerons à la lampe, *fig.* 52, et marquerons un trait au diamant sur la partie ainsi rétrécie. Cela fait, nous pèserons le tube vide, puis rempli d'eau jusqu'au repère *a*. La différence des poids donnera le volume du tube jusqu'en *a*. Ce volume obtenu, nous retirerons l'eau, nous sécherons le tube, le remplirons comme précédemment, mais cette fois avec le liquide sur lequel nous voulons expérimenter, l'alcool, par exemple. Le poids du tube plein d'alcool, diminué du poids connu du tube vide, donne le poids de l'alcool dont nous connaissons le volume, qui est celui du tube.

Nous avons, dans ce qui précède, négligé la température du tube, parce que nous avons promis déjà de fournir un moyen d'en tenir compte : *livre IV*.

Aréomètres.

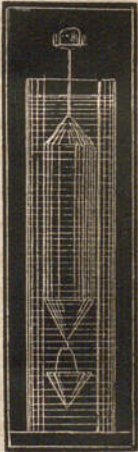
96. L'industrie emploie un moyen plus expéditif encore pour mesurer la densité des liquides, en se servant de l'aréomètre qui porte, suivant l'usage auquel on le destine, les noms de pèse-acide, pèse-liqueurs, densimètre, etc.

Fig. 53.



Ce petit instrument se compose, *fig. 53*, d'un tube de verre creux surmonté d'un tube gradué d'un diamètre beaucoup plus petit, et terminé inférieurement par un petit appendice garni de plomb ou de mercure servant de lest. Plongé dans un liquide, l'aréomètre s'y tient debout, s'y enfonçant plus ou moins suivant la densité du liquide. Il y pénètre, en effet, jusqu'à ce que le poids du volume déplacé équivaille au poids *fixe* de l'instrument. La division du tube où affleure le liquide porte un nombre qui indique la composition de celui-ci. Les aréomètres gradués à l'avance peuvent donc fournir en un instant les indications qu'on leur demande.

Fig. 54.



Il existe une autre espèce d'aréomètre qui est une véritable balance hydrostatique. Le cylindre creux et lesté qui le compose est terminé par une tige métallique mince que surmonte un petit plateau. Placé dans l'eau, il ne s'y plonge pas complètement. Pour peser un corps à l'aide de cet appareil, on le met sur le plateau supérieur, et on y ajoute des grains de plomb, des fragments de fils métalliques, de manière que l'aréomètre descende dans l'eau jusqu'au niveau d'un repère marqué sur la tige du plateau. On enlève alors le corps, et on le remplace par des poids jusqu'à ce que l'affleurement ait encore lieu. Ces poids produisant le même effet que le corps, lui équivalent donc. En mettant le corps sur le plateau inférieur, on aurait de même son poids dans l'eau, et, par soustraction, son volume.

Aréomètre
à poids
constant.

Aréomètre
à volume
constant.

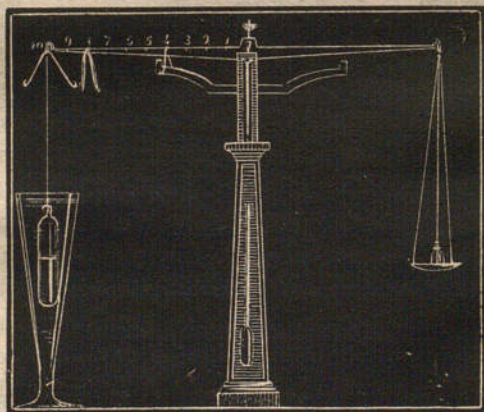
Ce petit appareil, très-employé par les minéralogistes et les géologues, fournit donc à lui seul les moyens de mesurer la densité des solides.

Balance
hydrostatique
de Mohr.

97. M. Mohr a imaginé, pour déterminer les densités des liquides, un moyen très-ingénieux, très-rapide et cependant encore inédit en France. Nous allons en dire quelques mots.

Prenez une balance hydrostatique bien sensible dont l'un des bras de levier soit partagé en 10 parties égales, et porte suspendu à son extrémité, à l'aide d'un mince fil de platine, un tube de verre lesté de manière qu'il tombe au fond de l'eau. Faites équilibre à ce tube plongé dans l'air à l'aide d'une tare déterminée une fois pour toutes et conservée toujours invariable. Cela fait, plongez votre tube dans de l'eau distillée à 40,1, et compensez la perte de poids à l'aide d'un crochet de laiton taillé convenablement et suspendu à l'extrémité du bras divisé ; préparez

Fig. 55.



deux ou trois crochets de même poids exactement et un autre d'un poids 10 fois moindre. Votre appareil sera complet : un seul exemple en fera comprendre l'usage. Pre-

nous la densité de l'acide sulfurique. Nous ferons plonger notre tube dans ce liquide, et nous trouverons que, pour que l'équilibre soit établi, il faut placer un gros crochet à la division 10, un autre à la division 8, et le petit à la division 4. Or, si nous représentons par 1 le poids du gros crochet ou le poids équivalent d'un volume d'eau égal au volume du tube, ou enfin le volume de ce tube, nous voyons que le gros crochet suspendu à la division 8 agit comme un poids égal à 0,8 placé à la division 10, et le petit crochet dix fois moins pesant, comme un poids égal à 0,04 situé aussi à la division 10. La perte de poids éprouvée par le tube plongé dans l'acide, ou le poids d'un volume d'acide égal à 1 est donc de $1, + 0,8 + 0,04$, ou à 1,84, qui représentera la densité cherchée. Une simple lecture, sans calcul, fournit donc le résultat désiré.

Table des densités des solides à 0°.

Platine éroui.....	23,000	Marbre.....	2,837
Or forgé.....	19,362	Verre de St-Gobain..	2,488
— fondu.....	19,258	Porcelaine de Chine..	2,384
Plomb.....	11,352	— de Sèvres.....	2,145
Argent fondu.....	10,474	Soufre natif.....	2,033
Cuivre en fil.....	8,878	Ivoire.....	1,017
Laiton.....	8,393	Albâtre.....	1,874
Acier.....	7,816	Houille compacte..	1,329
Fer.....	7,788	Glace.....	0,930
Étain.....	7,291	Sapin jaune.....	0,657
Fonte de fer.....	7,207	Peuplier ordinaire..	0,383
Zinc.....	6,861	Liège.....	0,240

Densité de quelques liquides à 0°.

Eau distillée.....	1,000	Eau de mer.....	1,026
Mercure.....	13,598	Vin de Bordeaux..	0,994
Acide sulfurique...	1,841	Vin de Bourgogne..	0,921
Acide nitrique.....	1,217	Huile d'olive.....	0,815
Lait.....	1,030	Alcool.....	0,815

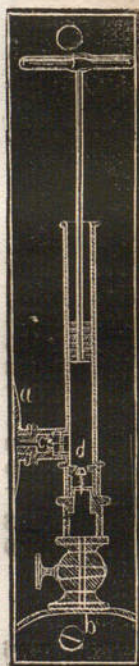
CHAPITRE VII.

POMPES.

98. La théorie des pompes est une application naturelle des principes exposés précédemment.

A quelques rares exceptions près, quelque compliquée que soit une pompe, elle se compose toujours essentielle-

Fig. 56.



Pompe à gaz
de Gay-Lussac.

ment d'un tuyau bien cylindrique appelé corps de pompe, d'un piston fermant exactement le cylindre dans lequel il se meut, de deux soupapes dont la position varie avec le but que doit atteindre la pompe, et qui ont pour objet de diriger dans un sens unique et déterminé le fluide mis en mouvement par les oscillations du piston; enfin, de deux tuyaux chargés, l'un, le tuyau d'aspiration, d'amener le fluide dans le corps de pompe, l'autre de le conduire à sa destination. L'un ou l'autre de ces deux tuyaux peut manquer.

Commençons par les diverses machines pneumatiques dont nous avons eu plusieurs fois l'occasion de faire usage avant de les avoir décrites.

99. La plus simple se compose d'un seul corps de pompe muni à sa partie inférieure de ses deux tuyaux dont l'un est mis en communication avec le vase que l'on veut vider du gaz qu'il contient, l'autre avec le réservoir où on veut transporter ce gaz. Ce sont ces deux tuyaux qui portent les soupapes directrices. Supposons que le piston soit au bas de sa course : si nous le soulevons, l'air qui restait

logé au-dessous de lui dans le corps de pompe se répandant dans l'espace agrandi qui lui est offert, verra diminuer son élasticité dans une proportion considérable ; il ne pressera donc plus contre les soupapes *c* et *d* avec une force capable de faire équilibre aux pressions extérieures exercées sur elles. La soupape *d*, pressée contre les parois de l'ouverture qu'elle garnit, la fermera exactement, tandis que la soupape *c*, disposée d'une manière inverse, cédant sous l'effort, laissera pénétrer dans le corps de pompe une partie du gaz contenu en *a*. Le piston, arrivé au haut de sa course, redescend et produit alors un effet inverse. Le gaz qui tend à repasser par l'ouverture *c* refoule la soupape qui ferme alors exactement cette ouverture, et plus le piston resserre l'espace qui est au-dessous de lui, plus l'élasticité de l'air renfermé dans cet espace augmente, plus la fermeture est hermétique en *c*. Mais, dans ce mouvement, il arrive bientôt un moment où le gaz intérieur acquiert une élasticité supérieure à l'élasticité du gaz contenu dans le vase *b*, la soupape *d* cède, et le gaz est chassé du corps de pompe dans le vase *b*. A chaque oscillation double du piston, un certain volume de gaz est donc soutiré du vase *a* pour être refoulé en *b*.

L'action de cet instrument, quelque parfait qu'il soit, est limitée par une double cause. Parvenu au bas de sa course, le piston laissera toujours au-dessous de lui un certain *espace nuisible* dans lequel une portion du gaz restera logée, et il arrivera un moment où ce gaz répandu dans tout le corps de pompe y conservera encore une élasticité capable de contre-balancer l'élasticité du gaz restant en *a*. La soupape *c*, également pressée dans les deux sens, cessera de s'ouvrir, et la machine ne fonctionnera plus. D'un autre côté, le corps de pompe est, à sa partie supérieure, librement ouvert à l'air qui pèse sur lui de tout son poids. Tant

Espace
nuisible.

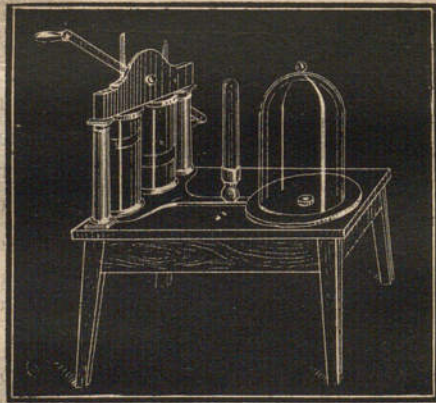
Pression
sur le piston.

que le gaz renfermé en *a* conserve une force élastique considérable, le piston, pressé dans les deux sens par des forces peu différentes, est d'un maniement facile; mais quand l'opération touche à sa fin, le gaz, devenu rare dans le corps de pompe, ne presse plus que faiblement contre le piston, et la pression atmosphérique, n'ayant plus ainsi qu'un contre-poids insignifiant, oppose à la manœuvre de ce piston un obstacle qui serait insurmontable s'il avait des dimensions un peu grandes.

100. Pour obvier à cet inconvénient qui restreint la puissance des pompes de Gay-Lussac, on construit les machines pneumatiques avec deux corps de pompes dont les pistons à tiges dentées viennent engrener aux deux extrémités d'un

Fig. 57.

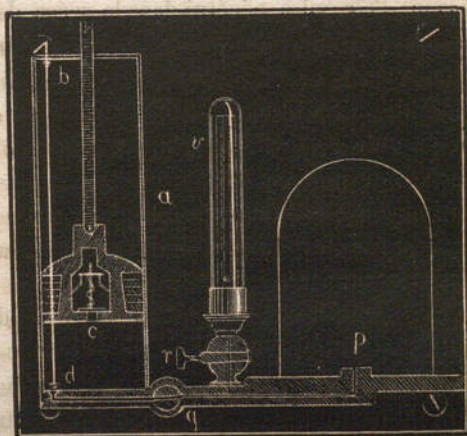
Machine
pneumatique.



même diamètre une roue dentée située entre eux. Les deux résistances, égales sensiblement, appliquées ainsi aux deux bras égaux d'un même levier, s'y équilibrent mutuellement. On gagne à cette disposition un double avantage. Deux pompes sont mises en mouvement à la fois, et la manœuvre de chacune d'elles se trouve facilitée par la présence de l'autre.

La machine pneumatique a pour but seulement de faire le vide dans les vases; l'air ou le gaz qu'elle en soutire

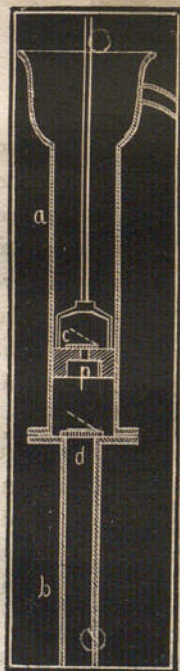
Fig. 58.



est versé dans l'atmosphère; le second tuyau n'est donc plus nécessaire: il est supprimé, et la seconde soupape dont il était muni est transportée dans le corps même du piston. La première soupape est elle-même modifiée dans sa construction; elle est formée d'un petit cône fermant exactement l'orifice du tuyau d'aspiration, et portée par une petite tige glissant à frottement doux dans le piston. Elle se trouve ainsi soulevée ou abaissée par le piston lui-même, et pour que sa course ne soit pas trop grande, qu'il n'y ait pas perte de temps et de travail dans le jeu de l'instrument, un petit renflement dont la tige de la soupape est munie à sa partie supérieure l'empêche de s'éloigner plus qu'il n'est nécessaire de l'ouverture qu'elle est destinée à fermer. A part ces différences, la machine pneumatique fonctionne exactement comme la pompe à air de Gay-Lussac. Lorsque le piston *c* est soulevé, la soupape in-

férieure est soulevée, une portion de l'air du récipient passe dans le corps de pompe; lorsqu'après avoir atteint le sommet de sa course, il redescend, cette soupape se ferme et emprisonne l'air qui a pénétré dans le corps de pompe, jusqu'à ce que sa force élastique croissante puisse contrebalancer la pression atmosphérique et soulever la soupape qui est logée dans le piston. A chaque oscillation complète de ce piston, une portion du gaz sera donc enlevée au récipient et versée dans l'atmosphère; un semblable résultat sera produit dans le second corps de pompe; seulement les effets seront croisés, l'un des pistons s'abaissant quand l'autre s'élève.

Fig. 59.

Machine
à compression.Pompe
aspirante.
Fig. 59.

Le jeu de cet instrument est d'ailleurs limité comme celui de la pompe de Gay-Lussac, par l'existence de l'espace nuisible impossible à faire disparaître complètement.

101. Renversez la direction dans laquelle s'ouvrent et se ferment les soupapes dans la machine pneumatique, et au lieu d'une machine destinée à soutirer l'air d'un vase, vous aurez une machine destinée à l'y condenser. La pompe de Gay-Lussac, déjà décrite, est d'un côté une pompe aspirante, et de l'autre une pompe foulante.

102. Les pompes aspirantes ou foulantes employées pour l'ascension des liquides, ne diffèrent en rien d'essentiel des pompes à air qui précèdent; elles fonctionnent même, dans les premiers moments, exactement comme une pompe aspirante.

Le tuyau d'aspiration plongeant dans de l'eau, si l'on vient à soulever le piston,

l'air renfermé dans l'appareil se répand dans un espace agrandi ; sa force élastique diminue ; la pression qu'il exerce sur l'eau renfermée dans le tuyau d'aspiration, devenue moindre, ne contre-balance plus la pression extérieure, et l'eau monte jusqu'à ce que la pression exercée par la colonne, ainsi soulevée, compense l'amoindrissement opéré dans l'élasticité de l'air. A chaque ascension du piston, l'eau monte d'une quantité correspondante jusqu'à ce qu'elle pénètre dans le corps de pompe, où elle subit les mêmes effets que l'air dont elle tient la place.

Dans toute pompe aspirante, l'effort qu'il faut faire pour soulever le piston est égal, à chaque instant, au poids d'une colonne d'eau qui aurait pour hauteur celle à laquelle l'eau est élevée au-dessus du niveau extérieur, et pour base la base même du piston.

L'ascension, dans les pompes aspirantes, étant due seulement à la pression extérieure qui, au niveau des mers, est mesurée en moyenne par une colonne de mercure de 0^m,760 de hauteur, et par une colonne d'eau de 10^m,336, l'eau ne peut jamais s'élever à plus de 10^m,336 dans un tuyau d'aspiration qui devra toujours être plus court. Une pompe aspirante pourrait cependant élever de l'eau à une hauteur indéfinie en donnant au tuyau de conduite qui surmonte le corps de pompe une longueur convenable.

103. La pompe aspirante et foulante est analogue à la pompe de Gay-Lussac. Elle a sur la pompe simplement aspirante l'avantage que l'effort se partage entre les mouvements d'élévation et de descension du piston : cet effort plus prolongé est par cela même moins énergique. Dans quelque cas cependant, comme dans la pompe à incendie, le tuyau d'aspiration est supprimé, le corps de pompe baigne dans le réservoir d'eau, et la pompe est simplement foulante.

Pression
sur le piston.

fig. 59.

Pompe
aspirante
et foulante,
fig. 60.

Pompe
foulante.

Fig. 60.

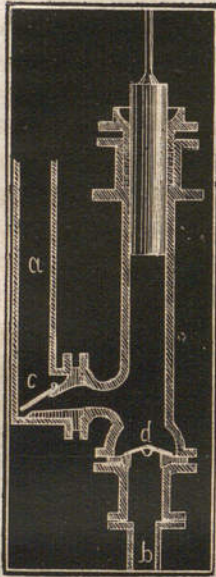
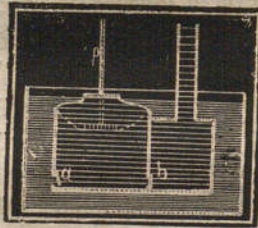
Pompe
des prêtres.

Fig. 61.



On a récemment beaucoup varié la forme des pompes. Les considérations précédentes peuvent suffire à l'intelligence de ces utiles instruments.

Lorsqu'il est utile, comme ici, d'avoir un jet d'eau continu, on place sur le chenin du tuyau de conduite un réservoir d'air. Cet air perd pendant l'élévation du piston l'excès d'élasticité qu'il avait acquise pendant l'abaissement du piston, de manière à éviter le temps perdu dans la première moitié de l'opération.

Les deux soupapes sont dans un ordre inverse dans les pompes foulantes et dans les pompes aspirantes.

104. Dans la pompe des prêtres *fig. 61* le piston est remplacé par une membrane flexible fixée, d'une part, à une tige analogue à celle du piston, de l'autre au corps de pompe lui-même. Cette membrane, alternativement soulevée et abaissée par la tige, remplit exactement le rôle du piston. Dans les lampes mécaniques de Gotten, qui seraient excellentes si elles n'étaient pas sujettes à trop de dérangements, l'ascension de l'huile est produite par deux ou trois pompes semblables mues par un mouvement d'horlogerie.

CHAPITRE VIII.

MOUVEMENTS DES CORPS SOLIDES ET FLUIDES.

105. Nous aurons peu de choses à dire sur les divers mouvements que peuvent prendre les corps : cet important sujet fait l'objet d'une science à part, et nous avons énoncé quelques-uns des principaux théorèmes de la dynamique, dans le livre I^{er}, chapitre VI. Ces théorèmes s'appliquent d'une manière générale aux corps sous quelque état qu'ils se présentent ; nous allons entrer ici dans quelques détails relatifs à chacun des trois états solides, liquides et gazeux, en tenant compte de la pesanteur.

Mouvements des solides.

106. Lorsqu'un corps est lancé dans l'espace dans une direction quelconque, son mouvement est modifié par l'action de la pesanteur qui agit sur lui comme s'il était en repos. Au bout d'un nombre quelconque de secondes, il se trouvera au-dessous du point qu'il aurait atteint s'il n'eût pas été pesant, d'une quantité égale à $4^m,9 \times t'$ ou à l'espace qu'il eût parcouru dans le même temps, s'il fût tombé librement sous la seule action de la pesanteur. Un boulet de 12, lancé obliquement avec une vitesse de 500^m par seconde atteindrait, en 10'', s'il n'était pas soumis à la pesanteur et *si l'air ne gênait pas sa marche*, à une distance de 5000^m : c'est un point situé à 490^m au-dessous de sa direction primitive qu'il viendra frapper. Lancé verticalement, il ne montera, pendant ces 10', qu'à 4510^m,

au lieu de 5000^m qu'il parcourrait dans le même temps et dans les mêmes conditions. Sa vitesse, continuellement amoindrie, étant devenue nulle, le boulet retombera, et, arrivé au point de départ, il aura recouvré précisément sa vitesse initiale. Dans le vide, un boulet de 12 atteindrait donc une hauteur de 12760^m; il mettrait 51" environ pour y arriver, emploierait le même temps pour redescendre, et, à son retour, il aurait repris la vitesse primitive de 500^m par seconde. Ces résultats ne se vérifient pas dans la pratique, à cause de la résistance considérable que l'air oppose aux corps animés d'une grande vitesse. Le boulet montera moins haut, emploiera plus de temps pour redescendre, et reviendra avec une vitesse moindre. Les nombres précédents montrent cependant encore assez bien la marche du phénomène.

Écoulement des liquides.

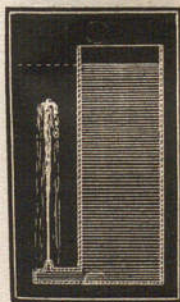
107. Chaque gouttelette d'un liquide lancé dans l'espace obéit aux mêmes lois que les corps solides; mais comme dans un même jet un grand nombre de ces gouttelettes se suivent d'une manière continue, un même instant nous en présente dans tous les états par lesquels elles passent, et leur trajectoire est ainsi dessinée sous nos yeux. Les propriétés spéciales des liquides exigent toutefois que nous entrions à leur sujet dans des considérations nouvelles.

Un liquide exerçant sur les parois du vase qui le contient une pression variable avec la hauteur de ce liquide, on comprend aisément qu'il devra s'échapper par les ouvertures qui lui sont offertes avec une rapidité d'autant plus grande que ces ouvertures seront situées plus profondément au-dessous de sa surface. L'écoulement est alors

soumis à une loi remarquable découverte par Toricelli , et dont voici l'énoncé.

108. *Lorsqu'un liquide s'écoule par une ouverture pratiquée en mince paroi, sa vitesse à la sortie est égale à la vitesse qu'aurait un mobile tombant dans le vide d'une hauteur égale à la hauteur du niveau du liquide au-dessus de l'orifice, et proportionnelle à la racine carrée de cette hauteur.* Quand cette hauteur est d'un mètre, la vitesse d'écoulement est à l'origine ou près de l'ouverture de $4^m,429$ par seconde, indépendante de la nature du liquide. La direction de la veine liquide est, en outre, normale à la paroi du vase comme les pressions.

Une veine liquide lancée verticalement devrait donc, sans l'influence des obstacles qui ralentissent son mouvement, s'élever à une hauteur égale à la hauteur du réservoir qui l'alimente. C'est sur ce principe qu'est fondée la théorie des jets d'eau.



Ce résultat toutefois est loin d'être obtenu dans la pratique. L'air oppose, en effet, une résistance à l'ascension des liquides comme au mouvement des solides; d'un autre côté, ces liquides doivent, avant de s'élancer dans l'air, parcourir des tuyaux dans lesquels ils éprouvent des frottements d'autant plus nuisibles que les conduits sont plus longs et plus étroits.

En cherchant à vérifier le théorème de Toricelli d'une autre manière, par la mesure du liquide écoulé en un temps donné, on trouve encore qu'il est en désaccord avec l'expérience; la dépense est moindre qu'il ne l'indique. Ce nouvel écart tient à une autre cause. La veine fluide est

Théorème
de Toricelli.

Jets d'eau.

Contraction
de la veine
liquide.

Fig. 63.



alimentée par l'eau qui avoisine l'ouverture; elle est formée par des particules qui ont suivi des directions variables avant d'arriver jusqu'à elle. Sous l'influence de ces vitesses convergentes, la veine se contracte fortement dès sa sortie. En tenant compte de cette circonstance, qui n'a d'ailleurs d'influence notable que quand l'ouverture n'est pas très-petite, le théorème de Toricelli peut très-bien servir, dans la pratique, à mesurer la vitesse avec laquelle un liquide s'écoule d'un vase par des ouvertures pratiquées en mince paroi. La dépense aura pour mesure la section contractée A de la veine, multipliée par le temps de l'écoulement et par la vitesse de cet écoulement.

Ajutages.

107. Les courts tuyaux, appelés ajutages, dont on garnit ordinairement les ouvertures des vases ou réservoirs, augmentent en général la dépense dans une proportion qui peut aller jusqu'à un tiers de la dépense en mince paroi.

Fig. 64.



Mouvement
vibratoire
dans les veines
liquides.

Si le tuyau est long, au contraire, il n'en est plus ainsi : les frottements ralentissent fortement la vitesse d'écoulement.

108. Les veines fluides présentent en général un phénomène intéressant. Transparentes ou unies dans une portion de leur étendue, elles se divisent, en un certain point, en un grand nombre de gouttelettes tombant isolément. Or, si on analyse convenablement un jet liquide obtenu dans des conditions favorables, on voit que ces gouttelettes sont animées en tombant d'un mouvement d'oscillation sur elles-mêmes, comme l'indique la figure. Cette oscillation remonte jusque dans

la partie fluide qui est ondulée, ainsi qu'on peut s'en convaincre en observant le filet de mercure qui s'écoule par l'extrémité d'un tube effilé.

Ce phénomène, qui se représente à des degrés divers dans tous les jets liquides ou gazeux, nous sera d'un grand secours dans l'acoustique pour expliquer la théorie des instruments à vent.

Fig. 65.

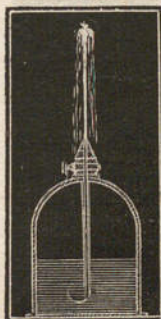


Fig. 66.



109. Les cabinets de physique possèdent un assez grand nombre d'instruments destinés à produire des jets d'eau ou des écoulements constants de liquides. Nous en allons citer quelques-uns.

La fontaine de compression se compose d'un vase en cuivre percé à sa partie supérieure d'une ouverture à robinet par laquelle pénètre un tube métallique qui descend jusqu'au fond du vase. Sur l'extrémité supérieure du tube, on peut visser ou une pompe foulante ou un ajutage percé d'un ou de plusieurs petits trous. On verse de l'eau dans l'appareil, et on comprime, dans l'espace resté libre au-dessus du liquide, de l'air qui, pressant fortement ce liquide, le lance par le tube à une grande hauteur.

Dans la fontaine de Heron, la pression qui donne naissance au jet est produite par une simple colonne d'eau. Cet instrument se compose de trois vases superposés *a, b, c* réunis par des tubes. Le vase *c* est primitivement rempli d'eau, et le vase *b* vide au contraire. Si nous versons de l'eau en *a*, ce liquide descendra en *b* dont il comprimera l'air avec une force égale au poids

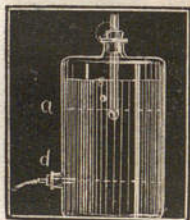
Fontaine
de compression.Fontaine
de Heron.

de la colonne liquide $b a$. Cette pression se transmettra jusqu'en c , et fera jaillir l'eau par l'ouverture d , avec une force représentée par la différence des hauteurs $a b - c d$.

Vase
de Mariotte.

110. Dans ces deux appareils, la vitesse du jet est variable comme la pression qui le produit. Le vase de Mariotte et les instruments fondés sur le même principe en fournissent un régulier, constant. Le vase de Mariotte se compose d'un flacon percé, à ses deux extrémités, de deux ouvertures par l'une des-

Fig. 67.



quelles a lieu l'écoulement, tandis que l'autre, muni d'un tube qui descend plus ou moins profondément dans le vase, permet à l'air de remplacer l'eau qui s'est écoulée. L'appareil fonctionne, examinons les conditions dans lesquelles il se trouve. L'air atmosphérique arrivant

jusqu'à l'extrémité du tube d'où il s'échappe en bulles, la pression sur l'étendue du plan du niveau a est égale à la pression atmosphérique. Cette pression croît au-dessous, et sur le plan de niveau d elle est égale à la pression extérieure augmentée de la pression due à $a d$. L'eau située à l'orifice d , pressée de dehors en dedans par l'air extérieur seulement, et pressée de dedans en dehors par une force supérieure, s'écoule avec une vitesse qui dépend de la hauteur $a d$, et qui restera constante tant que le liquide s'élèvera dans le vase au-dessus de a .

Au-dessus de a , la pression va en diminuant, et la force élastique de l'air contenu dans le vase est moindre que la force élastique de l'air extérieur d'une quantité correspondante à la hauteur de la colonne d'eau située au-dessus de a . Si nous bouchions avec le doigt le tube supérieur, l'écoulement continuerait encore jusqu'à ce que la pression de l'air

Fig. 68.

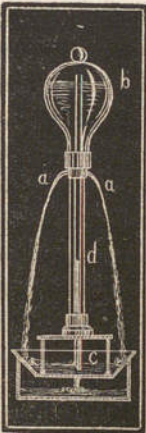


Fig. 69.

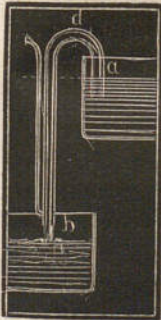


Fig. 70.



intérieur, augmentée de la pression du liquide au-dessus de *b*, ne surpassât plus la pression extérieure.

Ce résultat se reproduit périodiquement dans la fontaine intermittente.

111. Le siphon, tube recourbé en deux branches parallèles et inégales, *fig. 69*, sert à faire passer un liquide d'un vase supérieur dans un autre placé au-dessous; un petit tube latéral permet d'amorcer l'instrument, ce que l'on fait en plongeant l'extrémité *a* dans le liquide, et en aspirant l'air avec la bouche, après avoir fermé l'extrémité *b*. Les extrémités inférieures des deux colonnes liquides *a d* et *d b* supportent de bas en haut des pressions égales à la pression atmosphérique, et se font conséquemment équilibre; la plus longue entraînera donc la plus courte, et l'écoulement aura lieu avec une vitesse correspondante à la hauteur *ba*, abstraction faite des frottements. Un siphon ne pourrait plus fonctionner dans de l'eau si la branche *ad* avait plus de 10 mètres, et dans le mercure si elle avait plus de 0^m,760 de hauteur, parce que la pression extérieure serait insuffisante pour soutenir les deux colonnes liquides qui se sépareraient à leur partie supérieure.

Le siphon intermittent s'amorce de lui-même. Tant que le niveau du liquide ne s'y élève pas jusqu'en *n*, l'écoulement n'a pas lieu; à ce moment, il commence et continue jusqu'à ce que le niveau soit redescendu en *m*. Quelques fon-

Fontaine
intermittente.

Siphon.

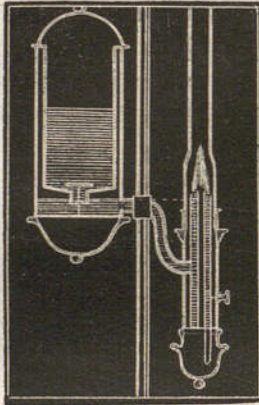
Siphon
intermittent.

Fontaines
intermittentes
naturelles.

taines intermittentes naturelles doivent cette particularité à une disposition analogue du conduit qui donne issue à l'eau.

Quinquets,
lampes.

Fig. 71.



La plupart des quinquets ou des lampes suspendues sont alimentés également par un écoulement intermittent. Le réservoir à huile est renversé, et le tube échancré qui le termine inférieurement descend un peu au-dessous du niveau du bec. A mesure que l'huile brûle, son niveau descend autour du réservoir, bientôt l'échancrure est mise à découvert, une bulle d'air pénètre dans le réservoir, et en fait sortir une quantité correspondante du fluide qui disparaîtra à son tour.

Écoulement des gaz.

112. L'écoulement des gaz est soumis à des causes de complication beaucoup plus nombreuses et plus actives que l'écoulement des liquides, à cause de la faible densité de ces fluides. La vitesse qu'ils acquièrent sous l'influence d'un excès de pression auquel ils sont soumis, est bien encore proportionnelle à la racine carrée des différences de pression ; mais elle dépend de la température et de la densité : un gaz chaud et dilaté ou un gaz léger comme l'hydrogène s'écoulant plus rapidement qu'un gaz froid ou qu'un gaz plus dense comme l'air ou l'acide carbonique. De plus, lorsque les différences de pression sont considérables, les lois du mouvement des gaz se compliquent d'une foule de causes encore imparfaitement analysées. Aussi l'air



ne pénètre guère dans le vide qu'avec une vitesse de 200 m par seconde, moitié seulement de la vitesse que lui assignerait la loi de Torricelli. Les veines gazeuses sont d'ailleurs animées d'un mouvement vibratoire comme les veines liquides, et cette oscillation qui fait parler les instruments à vent donne aussi, dans quelques cas, naissance à un phénomène qui la rend évidente. Si on applique un disque de bois ou de métal sur l'orifice large de 1 à 2 centimètres par lequel s'échappe, dans certaines forges, l'air qui les alimente, le disque, au lieu d'être repoussé par le jet rapide qu'il dévie dans sa direction, semble attiré par la tuyère; mais, en outre de ce phénomène singulier, on voit le disque osciller autour de sa position d'équilibre à laquelle il ne peut s'arrêter. Cette expérience peut être faite en petit avec un disque de carton et un large bouchon de liège dont on garnit l'extrémité d'un soufflet.

Mouvement
vibratoire
des veines
gazeuses.

113. A la surface du sol, une colonne d'air de 10^m de hauteur ne pressant pas plus sur sa base qu'une colonne de mercure de 1^{mm}, une différence de pression, même très-faible, peut imprimer à un gaz une vitesse très-grande, comme on le voit par le tableau suivant :

Vitesses
du vent.

Désignations.	Vitesses par heure en Kilomètres.	Différences de pression en mm. de mercure.
Vent seulement sensible.....	3,6	0,05
Vent modéré.....	7,2	0,02
Vent frais ou brise (tend bien les voiles)	21,6	0,08
Vent le plus favorable aux moulins...	25,2	0,25
Bon frais, très-bon pour la mer.....	32,4	0,41
Grand frais (fait serrer les hautes voiles)	43,2	0,73
Vent très-fort.....	54,0	1,14
Vent impétueux.....	72,0	2,04
Grande tempête.....	97,0	3,2
Ouragan.....	129,6	6,5
Ouragan qui renverse les édifices.....	162,0	10,"

En comparant ces résultats avec les variations journalières du baromètre, on comprend l'incessante mobilité de l'atmosphère. La dilatation, l'évaporation, la condensation des vapeurs, la présence ou l'absence du soleil, un simple nuage au-dessus de nos têtes, sont des causes suffisantes pour donner naissance à des courants d'air très-actifs. Tous les vents sont tantôt la cause, tantôt l'effet des différences observées dans les hauteurs barométriques à deux endroits plus ou moins éloignés l'un de l'autre. La raison première de ces deux phénomènes réside dans l'inégale distribution de la chaleur à la surface du globe.

Tirage
des cheminées.

114. Le mouvement de l'air dans les cheminées est dû à une semblable cause. La colonne d'air chaud du tuyau devenue plus légère par la dilatation qu'elle a subie, presse moins sur sa base qu'une égale colonne de l'air froid extérieur; elle est soulevée avec une force égale à la différence de ces deux pressions, et d'autant plus grande que le tuyau est plus élevé et la différence des températures plus considérable. L'ascension de l'air dans les cheminées détermine, dans l'appartement qui les renferme, un actif courant d'air, très-favorable sans doute à la santé, mais très-préjudiciable aussi à l'élévation de température désirée. Les ventouses, dont on ne saurait trop préconiser l'emploi judicieux, feraient disparaître les inconvénients sans nuire aux avantages attribués justement à un renouvellement convenable de l'air. Au reste, il est reconnu que l'hiver est d'autant plus pénible à traverser qu'il est habituellement moins rigoureux, parce qu'on prend moins de soins pour se préserver de ses atteintes.

Gaz
de l'éclairage.

115. La pression qu'il faut exercer sur le gaz de l'éclairage pour le lancer dans les mille ramifications des tuyaux qui le distribuent dans une grande ville, est relativement beaucoup plus grande à cause du frottement qu'il éprouve dans

ces tuyaux. Cette pression varie, suivant les conditions, de 50 à 60 mm d'eau, 4 à 5 mm de mercure.

Les gazomètres des usines à gaz sont composés de feuilles de tôle réunies à l'aide de clous rivés et formant de vastes cylindres ouverts à leur partie inférieure par laquelle ils plongent dans un bassin rempli d'eau. Deux tubes munis de robinets, et communiquant l'un avec les cornues où se forment les gaz, et l'autre avec les tuyaux de conduite, viennent déboucher dans le cylindre. Le premier sert à garnir le gazomètre pendant le jour, l'autre à le vider pendant la nuit. Cet énorme cylindre exercerait sur le gaz qu'il contient une trop grande pression; il est soutenu partiellement par des contre-poids suspendus à de fortes chaînes de fer. A mesure que le cylindre plonge davantage dans l'eau, il éprouve une perte de poids apparente croissant d'une manière correspondante; mais en même temps, les chaînes se raccourcissent du côté du contre-poids, et s'allongent du côté du gazomètre. Les choses sont calculées de telle manière que le déplacement de ces chaînes compense les effets de l'immersion du cylindre, en sorte que la pression et la vitesse d'écoulement du gaz soient maintenues à un état constant.

Gazomètre
des
usines à gaz.

CHAPITRE IX.

PHÉNOMÈNES MOLÉCULAIRES.

Forces
moléculaires.

116. Les actions moléculaires, résultat de la manifestation, à des distances extrêmement petites, de cette force universelle d'attraction qui maintient les astres dans leurs orbites, qui retient à la surface du sol les corps qui le recouvrent, se manifestent partout et toujours et dans les conditions les plus diverses, et au dehors et au dedans de nous-mêmes. Ce sont elles qui, variables avec les circonstances au milieu desquelles elles se produisent, donnent aux corps bruts les mille aspects qu'ils revêtent, opèrent en eux ces transformations indéfinies de la matière, véritable Protée entre les mains de la nature et des hommes; ce sont elles, enfin, qui, mises en jeu par la puissance des forces vitales, président à l'exercice de ces mystérieuses fonctions que nous étudions avec admiration dans les êtres organisés et vivants.

Dans notre traité de physique physiologique, nous les suivrons avec soin au milieu de la nature vivante; la chimie s'étend sur les transformations que subit la matière en dehors des forces vitales; mais notre tâche ici, toute restreinte qu'elle soit, dépasse encore de beaucoup les limites que nous imposent les dimensions de ce livre.

Variations
dans leur
intensité avec
les distances.

117. L'attraction moléculaire décroît rapidement quand la distance augmente; elle devient infiniment petite alors déjà que la distance est à peine sensible à l'œil. Les effets puissants de la pesanteur naissent du concours d'un nombre prodigieux de ces petites forces qui, allant de chaque point de la terre à chaque point du corps pesant, ajoutent entre elles leurs efforts.

Prenez deux balles de plomb, appliquez-les l'une sur l'autre par des surfaces fraîchement préparées avec un couteau, elles adhéreront fortement entre elles; il en sera de même de deux glaces bien dressées, de manière qu'elles puissent se toucher par un grand nombre de points à la fois. Comme ces sphères et disques resteront fixés l'un à l'autre dans le vide aussi bien que dans l'air, il faut bien écarter la pression atmosphérique dans l'explication de ce phénomène. Si vous approchez l'une de l'autre deux gouttes d'eau, de mercure,.... elles conserveront leur forme jusqu'au contact; à ce moment, elles se confondront l'une dans l'autre. Si vous déposez une goutte d'eau sur un vase de verre, de mercure sur une lame d'or ou d'argent bien propres, elles perdront leur forme et s'étaleront sur leur surface comme une goutte d'huile le fait sur de l'eau alcaline. Tous ces phénomènes sont dus aux forces moléculaires. C'est à cette cause qu'il faut attribuer l'adhérence aux surfaces qu'elles recouvrent de l'étamage des glaces formé par l'alliage de minces feuilles d'étain avec le mercure.

Dans quelques cas cependant, les gouttelettes liquides conservent leur forme; l'eau sur une substance grasse, le mercure sur le verre et certains métaux, sont dans ce cas. C'est que les forces moléculaires développées entre les particules liquides l'emportent sur les forces semblables qui se développent entre le liquide et le solide sur lequel il repose.

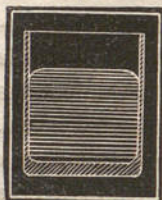
Fig. 72.



118. C'est au conflit qui naît entre ces forces qu'il faut aussi attribuer la forme de la surface des liquides contenus dans des vases. D'une manière générale, cette surface est horizontale; mais considérée près des parois solides, tantôt elle se relève: eau, vin..., fig. 72; tantôt elle s'abaisse: mercure fig. 73.

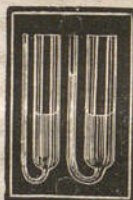
Adhésion
des corps.Inflexion
des surfaces
liquides
près des parois
des vases.

Fig. 73.

Phénomènes
capillaires.

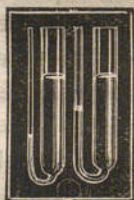
Dans les vases étroits, cette courbure s'étend à toute l'étendue de la surface, et donne alors naissance à des phénomènes particuliers connus sous le nom de *phénomènes capillaires*, à cause des conditions dans lesquelles ils se produisent. Ces phénomènes consistent (suivant que le liquide mouille le vase et que sa surface est concave, ou qu'il ne mouille pas et que sa surface est convexe) dans une élévation ou un abaissement de la surface infléchie, relativement au niveau que lui assignent les lois générales de la statique des liquides.

Fig. 74.

Ascension
ou dépression
des liquides
dans les tubes
capillaires.

119. Soudez à l'extrémité d'un fort tube de verre un tube d'un diamètre beaucoup plus petit et que vous recourberez parallèlement à la large branche; ce tube étant bien propre, versez-y de l'eau, de l'alcool, de l'essence de térébenthine, ... vous verrez le liquide s'élever dans la branche étroite ou capillaire, au-dessus de son niveau dans l'autre, d'une quantité variable suivant la nature du liquide, mais variable aussi avec le diamètre du petit tube.

Fig. 75.



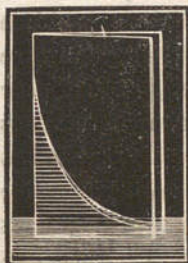
Opérez avec du mercure, au contraire, vous aurez une dépression au lieu d'une élévation dans la branche étroite.

Les hauteurs des colonnes soulevées ou déprimées par l'action capillaire sont, en raison inverse des diamètres des tubes, indépendantes d'ailleurs de l'épaisseur des parois de ces tubes.

Dans les espaces
étroits.

120. Le même phénomène a lieu dans l'espace compris entre deux plans très-rapprochés, et si ces deux plans se touchent par un côté et font entre eux un angle très-petit,

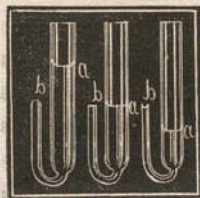
Fig. 76.



la nappe liquide soulevée s'élèvera rapidement à mesure qu'on se rapprochera du sommet de l'angle dièdre compris entre eux.

121. Les forces moléculaires déterminent la forme des surfaces liquides dans ces expériences ; cette forme règle à son tour la hauteur des colonnes capillaires. On peut reproduire, en effet, avec un même liquide, les phénomènes observés avec l'eau et le mercure. Prenons un tube capillaire recourbé

Fig. 77.



en deux branches parallèles et inégales, et versons-y graduellement de l'eau ; tant que la surface liquide n'aura pas atteint l'extrémité de la branche étroite et courte, nous observerons l'ascension capillaire *a c* ordinaire à l'eau ; mais à mesure que nous ajouterons de nouvelles quantités de liquide, l'inégalité des hauteurs disparaîtra, et lorsque les deux surfaces seront de niveau *b c*, la surface *c* sera devenue plane. Arrivés à ce point, nous pourrions encore ajouter de l'eau sans que l'écoulement s'effectue ; mais la dépression relative de la colonne capillaire *d c* sera compensée par la courbure inverse qu'aura acquise sa surface.

122. Les actions capillaires donnent aussi naissance à des phénomènes d'attraction et de répulsion. Deux corps légers s'attirent quand, placés sur l'eau, tous deux sont ou ne sont pas mouillés par le liquide ; ils se repoussent si l'un étant mouillé l'autre ne l'est pas.

123. L'imbibition est un phénomène qui se rattache directement à la capillarité ; c'est elle qui fait que tous les corps visiblement poreux, sucre, mèches..., plongés dans

Relation
entre la forme
de la surface
liquide
et la hauteur
de cette surface.

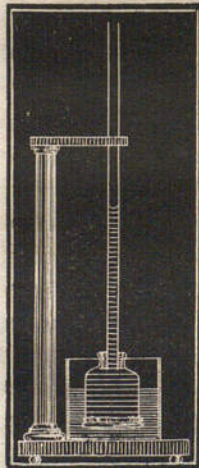
Attraction
et répulsion des
corps flottants.

Imbibition.

un liquide qui les mouille , soulèvent ce liquide à une certaine hauteur dans leur masse. L'imbibition est donc soumise aux mêmes lois que la capillarité ; elle varie avec la nature des liquides et des corps poreux , et c'est pour cette cause qu'un mélange d'eau et d'alcool renfermé dans une vessie se concentre peu à peu, l'eau s'en échappant plus rapidement que l'alcool ; elle sera d'autant plus active que les espaces interstitiels seront plus petits. Mais il est nécessaire surtout ici de tenir compte d'un phénomène important. L'air et les autres gaz adhèrent fortement à la surface des corps , en vertu d'une espèce d'imbibition gazeuse , et les liquides doivent chasser ou dissoudre cet air avant d'en prendre la place.

La capillarité due à la forme des surfaces liquides devra disparaître avec cette forme. Ce n'est donc point aux forces capillaires que l'on doit attribuer l'ascension de la sève dans les végétaux ; il faut faire intervenir ici l'endosmose d'une part, et de l'autre l'aspiration qui se produit dans les feuilles à la suite de l'évaporation dont leur surface est le siège.

Fig. 78.



Endosmose.

Endosmomètre.

124. L'endosmose , découverte en 1825 par M. Dutrochet, est un phénomène moléculaire ; mais il a été à peu près impossible, jusqu'à ce jour , de définir nettement le jeu des forces qui le produisent.

Prenez un tube de verre dont l'extrémité inférieure, élargie en entonnoir, est fermée par une membrane ficelée sur les bords ; versez-y de l'eau sucrée, et plongez-le dans un vase plein d'eau : pendant plusieurs jours, vous verrez le liquide monter dans votre tube, le ni-

veau s'y élever d'une manière croissante. Examinez ensuite vos deux liqueurs, vous trouverez le liquide extérieur sucré, et la dissolution intérieure plus étendue qu'elle ne l'était d'abord. Une certaine quantité d'eau sucrée est sortie de l'endosmomètre ; une plus grande quantité d'eau pure s'y est introduite.

125. Toutes les membranes, à des degrés divers, peuvent donner naissance à ce genre de phénomène jusqu'au moment où elles entrent en putréfaction. Il en est de même des lames minces d'ardoise ou d'argile cuite, bien qu'elles soient moins actives. Les lames calcaires ou siliceuses semblent complètement inactives.

126. Les conditions de l'endosmose sont les suivantes :

1^o Les deux liquides, ou un au moins, doivent avoir de l'affinité pour la substance interposée, et pouvoir l'imbiber facilement ;

2^o Les deux liquides doivent avoir également de l'affinité l'un pour l'autre, et pouvoir se mêler intimement ;

3^o Le courant se fait, en général, dans le sens du mouvement du liquide qui imbibe avec le plus de rapidité la substance interposée.

M. Matteucci a fait à ce sujet des expériences nombreuses qui l'ont conduit aux conclusions suivantes, relativement aux membranes :

1^o La membrane intermédiaire aux deux liquides dans le phénomène de l'endosmose, a une part très-active dans l'intensité du courant endosmométrique, ainsi que dans sa direction ;

2^o Il y a, en général, pour chaque membrane, une certaine position dans laquelle l'endosmose est plus intense ; les cas sont très-rares dans lesquels, avec une membrane fraîche, l'endosmose se fait également, quelle que soit sa disposition par rapport aux deux liquides ;

Lois
de l'endosmose.

3° La direction la plus favorable à l'endosmose est, en général, de la face interne à l'externe ;

4° La direction favorable à l'endosmose à travers les estomacs et les vessies urinaires, varie beaucoup plus qu'avec les peaux, suivant les différents liquides ;

5° Le phénomène de l'endosmose est étroitement lié à l'état physiologique des membranes ;

6° Avec les membranes desséchées ou altérées par la putréfaction, ou on ne remarque plus les différences ordinaires selon la position des faces de celles-ci, ou il n'y a plus endosmose.

Ces résultats sont d'une haute importance pour la physiologie. A la naissance de la découverte de M. Dutrochet, on a accordé à l'endosmose une part trop grande peut-être dans le jeu des fonctions vitales. Cette part est assez large par elle-même. Ce ne sont point les forces endosmomiques qui produisent les fonctions, mais c'est à l'aide des forces endosmomiques dirigées par elles que les forces vitales président à leur exercice.

Endosmose
gazeuse.

L'endosmose n'a pas lieu seulement d'un liquide à un autre ; elle s'effectue aussi d'un gaz à un autre gaz, d'un gaz à un liquide, d'un gaz dissous à un gaz libre. C'est l'endosmose qui permet à l'oxygène de l'air de passer dans le sang, à l'acide carbonique dissous dans ce fluide de s'exhaler au dehors.

LIVRE TROISIÈME.

CHALEUR.

CHAPITRE I^{er}.

EFFETS GÉNÉRAUX DE LA CHALEUR; THERMOMÈTRE.

127. Le calorique, ou plus vulgairement la chaleur, est une force ou un agent aussi universel que l'attraction elle-même. Le philosophe peut concevoir une matière qui ne soit pas pesante et qui soit entièrement privée de calorique; le physicien ne saurait faire des abstractions de ce genre : Nul ne sait, en effet, ce qu'il adviendrait de la matière dans ces conditions.

La chaleur produit des effets variés à l'infini; elle est indispensable à l'exercice des fonctions vitales dans les végétaux et les animaux, qui meurent ou chez lesquels la vie est suspendue quand ils sont exposés à un refroidissement porté au-delà d'une certaine limite qui diffère suivant les espèces. Son accroissement ou sa diminution dans nos organes produit en eux ces impressions bien connues de chaleur ou de froid. Elle détermine ou facilite les réactions chimiques et les métamorphoses des corps; elle change leur couleur, leurs dimensions, leur consistance, leur aspect. De ces divers phénomènes nous n'avons à étudier ici que les changements de volume et d'état; mais pour le faire d'une manière scientifique, il nous faut un instrument qui définisse et précise nettement les conditions dans lesquelles

on les observe. Le thermomètre satisfait à ces conditions. Le toucher nous permettrait bien de décider qu'à un même moment tel corps est plus chaud que tel autre, surtout si la différence est grande ; mais les impressions que nous transmettent nos organes sont essentiellement variables comme les conditions dans lesquelles ils se trouvent : l'eau d'une même source nous paraîtra chaude en hiver et glaciale en été. Le thermomètre, au contraire, toujours identique à lui-même, tant qu'il n'a pas été détérioré par le temps ou l'usage, n'obéit, dans ses indications, qu'à la quantité seule de chaleur qu'il possède.

Fig. 79.

Thermomètre.



128. Ce précieux instrument, fondé sur la dilatabilité des corps, se compose d'un réservoir cylindrique ou sphérique surmonté d'un tube capillaire ou d'un diamètre très-petit, et contenant à l'intérieur de l'alcool ou mieux du mercure. Le mercure, en effet, peut toujours facilement être obtenu dans un grand état de pureté, et les indications fournies par les thermomètres construits avec ce liquide sont beaucoup plus comparables entre elles que celles qui sont données par les thermomètres à alcool.

Pour construire un bon thermomètre, il faut choisir d'abord un tube bien cylindrique à l'intérieur, ce dont on s'assure en y introduisant une petite colonne de mercure et la promenant dans toute l'étendue du tube.

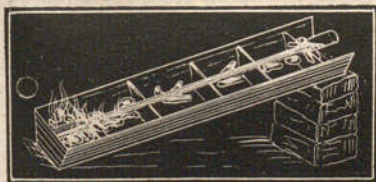
Si elle conserve partout la même longueur, la condition indiquée se trouve remplie. Alors, à l'une des extrémités du tube on soude ou on souffle un réservoir, et on soude à l'autre un tube un peu large destiné à faciliter les opérations ultérieures, fig. 80.

Fig. 80.



L'appareil étant ainsi préparé et bien sec, on verse du mercure dans le tube supérieur, on incline et relève alternativement l'instrument pour faire descendre le plus de liquide possible dans le réservoir inférieur, et on le couche sur une grille inclinée pour faire bouillir le mercure. A cet effet, on dispose quelques charbons, d'abord sous le réservoir supérieur, puis sous le tube capillaire, puis enfin sous le réservoir inférieur. Lorsque le mercure bout franchement, on redresse le tube en laissant l'ébullition continuer quelques instants dans cette position, et on le retire entièrement. Les vapeurs de mercure ont chassé toute trace d'humidité, et doivent avoir entraîné tout l'air du réservoir et du tube qui se trouvent exactement remplis de mercure.

Fig. 81.



Le thermomètre étant refroidi, on l'expose au plus haut degré de chaleur qu'il doit supporter dans la suite; on vide le réservoir supérieur, et on détache celui-ci en

fondant à la lampe l'extrémité supérieure du tube, qui reste par ce moyen entièrement privé d'air. Il est bon de laisser une petite ampoule au haut du tube thermométrique: quelquefois, en effet, on voit apparaître dans les meilleurs thermomètres de petites bulles d'air, invisibles d'abord, mais qui finissent parfois par diviser la colonne mercurielle et rendre impossible l'emploi du thermomètre. L'ampoule supérieure permet de remédier à cet inconvénient, et de rejeter la bulle d'air au-dessus de la colonne.

Le thermomètre étant arrivé à ce point, il ne reste plus qu'à le graduer.

Graduation
du thermomètre.

Pour accomplir cette opération, on plonge l'instrument dans de la glace pilée et fondante, dont on remplit un vase percé à sa partie inférieure. Le mercure descend dans la tige du thermomètre; quand elle est stationnaire depuis un quart d'heure environ, on dessine un trait sur la tige au point où elle affleure. C'est à ce point que correspondra le zéro de l'instrument. On transporte alors celui-ci dans un vase contenant de l'eau bouillante, *fig. 82*, de manière que tout le mercure plonge dans la vapeur d'eau, et unique-

Glace fondante.

Eau bouillante.

Fig. 82.



ment dans la vapeur. Le mercure a monté pendant cette opération; on dessine encore un trait au point où il s'arrête: ce sera, si l'opération a été faite sous la pression atmosphérique 760^{mm}, la division 80 pour les thermomètres Réaumur, et la division 100° pour les thermomètres centigrades. Nous indiquerons, chapitre VIII, les corrections qu'il faudrait apporter à cette dernière détermination, si l'ébullition s'était effectuée sous une pression différente de la pression 760^{mm} adoptée conventionnellement.

Températures.

129. L'intervalle compris sur la tige entre les deux points déterminés comme il précède, est divisé en 80 ou 100 parties égales, suivant le thermomètre, et des divisions semblables sont également tracées au-dessus et au-dessous dans toute l'étendue du tube. Ces divisions correspondent à autant de *degrés* de chaleur; elles désignent un égal nombre de *températures*. On dit qu'un corps est

à la température 10° , par exemple, quand le thermomètre qui la partage marque 10° .

Fig. 83.



130. L'échelle Réaumur a été long-temps exclusivement employée en France, et on trouve encore beaucoup de thermomètres ainsi gradués, bien que l'échelle centigrade soit généralement préférée. Il est, au reste, facile de convertir l'une dans l'autre les indications de ces instruments. 100° centigrades équivalent à 80° Réaumur; 1° centigrade vaut donc $\frac{1^{\circ}}{100} = \frac{4}{100}$ de degré Réaumur, et un degré Réaumur $\frac{100}{80} = \frac{5}{4}$ de degré centigrade. Il faudra donc multiplier les degrés centigrades par $\frac{4}{5}$ pour les transformer en degrés Réaumur, et ceux-ci par $\frac{5}{4}$ pour les transformer en ceux-là.

Lorsque deux thermomètres gradués de la même manière l'ont été avec les précautions convenables, en quelque endroit qu'ils aient été construits, ils donneront les mêmes indications dans les mêmes circonstances; ils seront comparables.

131. Le thermomètre à alcool est loin d'offrir ces garanties; aussi ne s'en sert-on, dans les recherches scientifiques, que pour les très-basses températures auxquelles le mercure ne résisterait pas sans se congeler.

Au reste, le thermomètre à alcool se construit plus facilement que le thermomètre à mercure; il bout à une température beaucoup plus basse, et on n'y fait jamais le vide au-dessus de la colonne liquide. On le gradue en général en le comparant à un bon thermomètre à mercure.

Échelles
Réaumur
et centigrade.

Thermomètre
à alcool.

CHAPITRE II.

DILATATION DES SOLIDES.

132. Les variations qu'éprouvent les corps dans leurs dimensions, sous l'influence inégale de la chaleur, jouent un rôle important dans les arts. Leur mesure exacte y est souvent réclamée; elle est indispensable dans l'appréciation des phénomènes physiques. C'est à ce double titre que nous allons nous en occuper.

Tous les corps croissent en volume ou se dilatent lorsqu'ils s'échauffent : une seule exception nous est présentée par l'eau, dans des conditions définies et restreintes; mais ils se dilatent de quantités variables suivant leur nature, même lorsqu'ils sont placés dans des conditions semblables. Les nombres qui mesurent ces augmentations de volume sont nommés coefficients de dilatation.

Coefficient
de dilatation
cubique.

133. On appelle *coefficient de dilatation cubique* la quantité dont l'unité de volume d'un corps se dilate lorsque sa température varie de 0° à 1° , ou quelquefois de 0° à 100° .

Coefficient
de dilatation
linéaire.

La dilatation des corps s'effectue dans tous les sens; dans des cas assez nombreux cependant, et lorsqu'on emploie des corps solides, on ne considère que leur accroissement en longueur. Le *coefficient de dilatation linéaire* exprime la quantité dont l'unité de longueur d'un corps se dilate entre 0 et 1° , ou entre 0 et 100° .

Coefficient
de dilatation
linéaire.

134. Si les corps solides de même nature étaient absolument homogènes et de composition identique, il ne serait pas nécessaire de mesurer à la fois pour une même substance, et le coefficient de dilatation linéaire et le coefficient de dilatation cubique; trois fois le premier donne-

rait le second. Mais il n'en est pas ainsi; il serait difficile même de trouver deux tiges d'une même matière qui, sous la même longueur, se dilatassent d'une égale quantité. Cela tient à ce que ces corps ne sont jamais purs, et que, le fussent-ils, leur constitution moléculaire se modifie suivant le travail auquel on les a soumis. Dans les expériences délicates, on devra donc mesurer directement le coefficient qu'on a intérêt à connaître, et nous indiquerons le moyen d'y parvenir. Dans l'industrie cependant, où tant de précision n'est ordinairement pas nécessaire, le coefficient linéaire suffit le plus souvent : c'est par lui que nous commencerons.

Fig. 84.

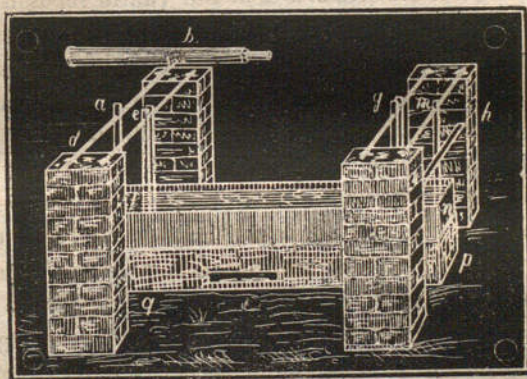
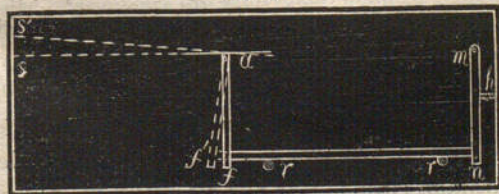
Appareil
de Lavoisier
et Laplace.

Fig. 85.



133. Les déterminations les plus anciennes et les plus précises, peut-être, remontent à Lavoisier et Laplace :

Mesure
de la dilatation
linéaire.

celui-ci grand mathématicien et grand astronome, celui-là chimiste de génie, enlevé, jeune encore, à la science, par notre ouragan révolutionnaire. L'appareil dont ils se sont servis dans leurs recherches est représenté *fig. 84*; un dessin théorique y a été joint, *fig. 85*. Quatre forts piliers en maçonnerie avaient été construits dans un jardin et réunis deux à deux par des tiges horizontales. Deux de ces tiges *e* et *g* portaient chacune deux lames de verre parallèles réunies à leur partie inférieure par un rouleau *r* sur lequel reposait la barre en expérience *n f*. L'une des extrémités de celle-ci s'appuyait contre un obstacle invariable formé par un système de deux lames de verre croisées *m n* et *h*. Sur l'autre reposait l'extrémité d'une lame de verre *a f*, dont la barre *d b* mobile autour de son axe entraînait dans ces mouvements une lunette *b*. Une cuve allongée, posée sur un fourneau de même forme, enveloppait la barre métallique *n f*.

Cette barre était d'abord environnée de glace pilée versée dans la cuve, et prenait la température 0° . On lisait dans la lunette la division, sur laquelle elle était dirigée, d'une mire placée à deux ou trois cents mètres de l'appareil; puis on enlevait la glace, on la remplaçait par de l'eau qu'on portait à l'ébullition. La barre échauffée s'allongeait; mais fixée en *n*, c'est par un déplacement de l'extrémité *f* qu'elle manifestait sa dilatation, déplacement qui, par l'intermédiaire du levier *f a*, se transmettait à la lunette *b*, et se trouvait accusé et mesuré par le nombre de divisions que ce dernier instrument parcourait sur la mire. Par cet artifice, on augmentait d'une manière simple et sûre les effets de la dilatation toujours très-petite des solides, et on en facilitait l'évaluation. Si *f a* est de 1 mètre, et si la distance *a s* de la mire à l'appareil est de 200^m , le déplacement *s s'* de la lunette sur la mire est égal à 200 fois l'al-

longement ff' de la barre, connaissant le premier, on en déduira donc le second. Soit $s s'$ égal à $0^m,3435$, on aura ff' égal à $0,3435$ divisé par 200 , ou à $0,0017174$, nombre qui est le coefficient de dilatation du cuivre.

136. Voici le tableau des coefficients de la dilatation linéaire entre 0 et 100° des corps les plus employés.

Zinc	0,002405	Or	0,001466
Plomb.....	0,002843	Bismuth.....	0,001392
Etain,.....	0,002173	Fer.....	0,001235
Argent.....	0,001910	Acier.....	0,001079
Cuivre jaune...	0,001878	Platine.....	0,000884
Cuivre.....	0,0017173	Verre.....	0,000861

137. La dilatation des métaux n'est pas régulière ; ils se dilatent un peu plus de 100° à 200° que de 0 à 100° , bien que la différence des températures reste la même, et ce phénomène devient de plus en plus sensible à mesure que s'élève la température. C'est là souvent une source de grands embarras pour le physicien.

Quoi qu'il en soit, une tige qui à 0° a 1 mètre de longueur atteindra donc $1^m,001235$ à 100° , environ $1^m,002470$ à 200° , etc. Une ligne de chemin de fer de 10 lieues ou 40,000 mètres, posée en hiver à la température 0° , s'allongerait en passant à 30° , température moyenne des jours d'été à l'ombre, de $14^m,7$; et comme la force de dilatation est presque irrésistible, il en résulterait des flexions, des plissements qui pourraient avoir de désastreuses conséquences, si on n'avait soin de laisser toujours un petit intervalle entre deux rails successifs. La même observation peut être faite à l'égard des tuyaux qui servent à la conduite des eaux ou du gaz de l'éclairage ; bien que leur position souterraine les garantisse contre les effets du froid et de la chaleur, on a soin, s'ils sont en fonte, de faire emboîter l'une dans l'autre les diverses parties qui les com-

Variation
du coefficient de
dilatation.

Applications
de la dilatation
des solides.

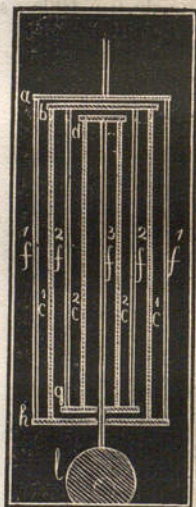
posent , en garnissant de plomb les interstices qui pourraient donner passage au fluide.

Parmi les autres applications nombreuses que l'on peut faire de la dilatation des corps , nous en citerons quelques-unes.

Pendule
compensateur.

138. Nous savons que la marche de nos pendules est réglée par celle de leurs balanciers ; si ceux-ci restaient soumis aux variations de longueur qui résultent ordinairement des changements de températures , elles avanceraient en hiver ou retarderaient en été , ce qui a lieu , en effet , pour les horloges ou pendules dont les balanciers ne sont pas compensés.

Fig. 86.



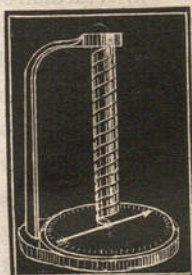
de la traverse *d*.

En examinant attentivement la disposition de ces tiges , on voit que la dilatation des deux paires de tiges de fer et de la tige *f* également en fer tend à faire descendre la lentille *l* , tandis que la dilatation des deux paires de tiges de cuivre tend à la faire remonter. Si toutes ces tiges

Les balanciers ou pendules compensés les plus ordinaires sont composés de neuf triangles disposées parallèlement , cinq en fer et quatre en cuivre jaune ou laiton alternant entre elles , comme le représente la *fig. 86*. La tige principale est coupée près de son point de suspension , et supporte une traverse en cuivre *a* , à laquelle sont fixées deux tiges de fer *f* réunies à leur partie inférieure par une 2^e traverse *h*. Sur celle-ci sont appuyées deux tiges en cuivre *c* réunies par la 3^e traverse *b* qui supporte deux nouvelles tiges en fer *f*. Enfin , la 4^e traverse *g* porte deux autres tiges en cuivre *c* qui soutiennent la tige *f* du balancier par l'intermédiaire

étaient égales à 1 mètre, on voit, d'après le tableau précédent, que la lentille descendrait, pour une élévation de température de 100° , de $0,001233 \times 3$ ou de $0,003705$ par la dilatation du fer, et qu'elle remonterait de $0,001873 \times 2 = 0,003746$ par la dilatation du cuivre. En effet, les deux tiges $f' f'$, par exemple, agissent de concert et produisent le même résultat par rapport au déplacement de la lentille, que si elles étaient réduites à une seule. L'inégalité des tiges compense l'inégalité des nombres précédents, et le pendule conserve sensiblement une longueur et une marche constantes pour toutes les températures.

Fig. 87.



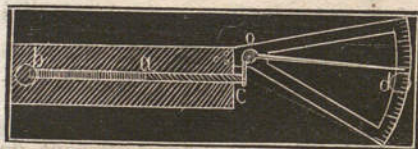
139. La faiblesse du coefficient de dilatation des solides est un obstacle à l'emploi de ces corps comme appareil thermométrique dans les circonstances ordinaires ; cependant M. Breguet est parvenu à faire avec eux un thermomètre d'une exquise sensibilité. Son instrument se compose d'un ruban formé par la superposition et la soudure de trois minces lames d'argent, d'or et de platine, contourné en hélice, fixé par son extrémité supérieure, et muni, à son extrémité inférieure, d'une aiguille. Les variations de température produisent, des dilatations inégales dans les métaux qui composent l'hélice, font tordre ou détordre celle-ci, et amènent l'aiguille sur les divers points d'un cadran situé au-dessous d'elle. Ce thermomètre, peu usité, est cependant d'un grand secours dans quelques recherches scientifiques.

Dans des conditions opposées, lorsqu'il s'agit d'évaluer des températures très-élevées, les métaux forment aussi la partie essentielle de quelques pyromètres. Dans la peinture sur porcelaine, les couleurs broyées avec des substances capables de former, sous l'influence de la chaleur,

Thermomètre
de Breguet.Pyromètre
de Sèvres.

un émail incolore, et appliquées sur le vase, doivent être cuites à un feu ménagé et gradué d'après leur nature. L'instrument qui sert à avertir l'opérateur qu'il est arrivé au point qu'il désire atteindre se compose d'une plaque de porcelaine dans l'épaisseur de laquelle est pratiquée une rainure destinée à recevoir une tige de platine *ba* dont

Fig. 88.



l'une des extrémités est appuyée sur le fond de la rainure, tandis que l'autre met en mouvement, par l'intermédiaire d'une tige de porcelaine, une aiguille mobile sur un cercle divisé. Les divisions que celle-ci parcourt dans sa marche correspondent aux divers degrés de chaleur par lesquels passe le fourneau. Un ouvrier habile peut toutefois juger avec une certaine exactitude de la température de son fourneau sur le simple aspect de la couleur qu'il présente. Voici quelques indications qui ont été fournies sur ce sujet par M. Pouillet, et par lesquelles nous terminerons ce chapitre, renvoyant au suivant la mesure des dilatations cubiques.

Rouge naissant correspond à.....	525°	Orange foncé.....	1100°
Rouge sombre.....	700	Orangé clair.....	1200
Cerise naissant.....	800	Blanc.....	1300
Cerise.....	900	Blanc soudant.....	1400
Cerise clair.....	1000	Blanc éblouissant ...	1500

CHAPITRE III.

DILATATION DES LIQUIDES.

140. Les liquides n'ayant pas de forme qui leur soit propre, et prenant toujours celle des vases dans lesquels ils sont renfermés, nous n'avons jamais occasion de considérer leur dilatation en longueur. C'est donc seulement de la dilatation en volume ou cubique qu'il sera question dans ce chapitre. Une difficulté cependant se présente à nous : les vases se dilatent eux-mêmes. Prenons un ballon de verre terminé par un col étroit, remplissons-le d'un liquide froid dont le niveau s'élève jusqu'au premier tiers environ du col, en un point que nous aurons marqué, et plongeons-le rapidement dans l'eau chaude. Au premier moment, le liquide descendra dans le tube, comme s'il se contractait au lieu de se dilater. Ce n'est qu'au bout de quelques instants qu'il remontera pour dépasser son niveau primitif. Le verre du ballon recevra, en effet, le premier l'impression de la chaleur ; sous l'influence de cet agent, sa capacité se sera accrue avant que la chaleur ait pénétré jusqu'au liquide. Ultérieurement, le liquide monte parce qu'il se dilate plus que le verre ; mais la dilatation de celui-ci persiste, et la dilatation visible ou *apparente* du liquide s'en trouve diminuée d'autant.

On peut donc considérer dans un liquide sa dilatation réelle, *absolue*, ou sa dilatation apparente plus faible que la première de toute la dilatation du vase qui le contient.

141. Il existe cependant un moyen de mesurer directement avec une grande précision la dilatation absolue de mercure, en s'appuyant sur les lois de l'équilibre des liquides dans les vases communicants, § 77. Ce moyen, mis en pratique

Dilatation
des enveloppes.

Dilatation
apparente.

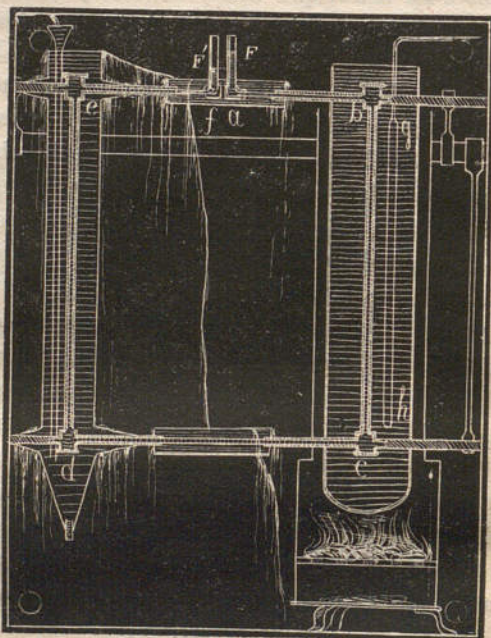
Dilatation
absolue.

Mesure
de la dilatation
absolue
du mercure.

par MM. Petit et Dulong, a été repris récemment par
M. Regnault. L'appareil dont s'est servi cet éminent physi-

Fig. 89.

Appareil
de M. Regnault.



cien se compose de deux tubes de fer *bc* et *ed* réunis à leur partie inférieure par un troisième tube de fer bien horizontal *cd*, et munis à leur partie supérieure de deux autres tubes *ba* et *fe* surmontés de tubes de verre *F* et *F'*. Le tube *bc* est renfermé dans une caisse en fer pleine d'huile et disposée dans un fourneau qui permette d'élever la température; le tube *ed*, au contraire, est maintenu à une température constante au moyen d'un courant d'eau sans cesse renouvelée autour de lui. Le système de tubes *FabcdeF'* étant rempli de mercure, et les deux colonnes verticales *cb* et *de* étant à une même tempéra-

ture, le mercure s'élèvera au même niveau dans les deux tubes F et F'; mais si on vient à échauffer bc , la colonne de mercure qui y est renfermée se dilate, devient moins dense, et la diminution de pression qu'elle exerce sur sa base doit être compensée par une élévation plus grande du mercure en F. Cette élévation F F', comparée à la hauteur cb de la colonne échauffée, et à l'élévation t de la température de bc au-dessus de la température de cd , conduit, à l'aide d'une formule simple, au résultat désiré.

142. En opérant de cette manière avec toutes les précautions nécessaires, M. Regnault a trouvé que le mercure se dilate pour une élévation de température de 1° .

Vers 0° de	0,00017903
100°	0,00018305
200°	0,00018909
300°	0,00019413
350°	0,0001966

Fig. 90.



nombres qui augmentent assez rapidement avec la température.

La dilatation absolue du mercure étant connue, on peut mesurer facilement la dilatation des enveloppes de verre, et par suite la dilatation absolue des autres liquides.

143. Prenons un tube de verre divisé, par exemple, en 120 parties d'égale capacité, soudons à son extrémité un réservoir V, pesons l'appareil vide, puis rempli de mercure jusqu'au zéro a . La différence des poids, soit 21g, sera le poids du mercure introduit. Ajoutons du mercure jusqu'en b , et pesons de nouveau, la différence entre la troisième pesée et la seconde, soit 0g,305, sera le poids du mercure contenu dans les 100 divisions de a en b ; une

Jaugeage
du réservoir.

seule de ces divisions en renfermera 0,00305. Le réservoir contient donc 21 divisé par 0,00305 ou 6885 fois plus de mercure qu'une des divisions du tube, et par conséquent son volume est aussi 6885 fois plus grand.

Mesure
de la dilatation
apparente.

Cette opération terminée, introduisons du mercure dans notre tube thermométrique, de manière qu'à 0° le niveau monte en *a*, puis échauffons l'appareil jusqu'à 100°, le mercure montera et s'arrêtera à la division 110, par exemple. Le volume du mercure égal à 6885 se sera accru de 110, et la dilatation *apparente* de l'unité de volume du liquide de 0 à 100° sera donc de $\frac{110}{6885} = 0,0160$. Mais la dilatation *absolue* du mercure est dans les mêmes limites de 0,018; la différence $0,018 - 0,016 = 0,002$ sera la dilatation entre 0 et 100° de l'unité de volume du réservoir de verre.

Mesure
de la dilatation
des enveloppes.

Mesure
de la dilatation
d'un liquide
quelconque.

Si nous voulons maintenant mesurer la dilatation d'un liquide quelconque, nous viderons notre thermomètre du mercure qu'il contient, nous le remplacerons par le liquide sur lequel nous voulons opérer, l'eau par exemple, et en agissant sur ce liquide exactement comme sur le mercure, nous trouverons que sa dilatation apparente entre 0° et 100° est de 0,041; et comme la dilatation du vase est de 0,002, la somme $0,041 + 0,002 = 0,043$ représentera la dilatation absolue de l'eau de 0° à 100°.

Maximum
de densité
de l'eau.

144. La dilatation des liquides est encore moins régulière que celle des métaux; l'un d'eux, l'eau, présente même un phénomène remarquable. Si on prend de l'eau à 0° et qu'on l'échauffe graduellement, on verra son volume diminuer loin de s'accroître, jusqu'à 4° environ, point à partir duquel elle se dilatera comme tous les autres corps. L'eau a donc un minimum de volume et par suite un *maximum de densité* à une température voisine de 4°.

Cette particularité que présente l'eau est d'une grande

importance dans la nature; sans elle, la vie serait impossible, au sein des eaux, pendant les hivers rigoureux, du moins avec une organisation semblable à celle qui a été donnée aux êtres qui les peuplent. Considérons, en effet, l'eau d'un lac au moment où les froids commencent à sévir: l'eau se refroidit par sa surface, mais les couches qui perdent ainsi de leur chaleur se contractent, augmentent de densité, tombent au fond, et sont remplacées par de nouvelles couches qui subiront les mêmes effets. Si la contraction de l'eau était indéfinie, ce renouvellement des couches aurait lieu jusqu'à ce que toute la masse liquide fût congelée, et les poissons périraient, à moins qu'ils fussent organisés de manière à supporter, comme la marmotte, un engourdissement de plusieurs mois. Au lieu de cela, l'eau a un maximum de densité à 4° ; un abaissement plus

Fig. 91.



grand de température la dilate et la rend plus légère; les couches refroidies au-delà de 4° restent donc à la surface qui peut se congeler, tandis que le fond se maintient à 4° . On donne, dans les cours de physique, une idée de ce phénomène à l'aide de l'instrument représenté *fig. 91*. Une longue éprouvette pleine d'eau tiède et garnie de deux thermomètres *a* et *d* porte vers sa partie supérieure un manchon que l'on remplit d'un mélange de glace et de sel. Sous l'action de cette cause de refroidissement, on voit d'abord le thermomètre *d* descendre jusqu'à $4^{\circ},1$, le thermomètre *a* restant à peu près stationnaire; mais à partir de ce moment, c'est *d* qui reste stationnaire, et *a* qui s'abaisse jusqu'à 0° et même au-dessous.

145. On peut comprendre actuellement de quelle importance il est, dans les opérations délicates, d'observer le thermomètre en même temps que le baromètre. Deux co-

Correction
des hauteurs
barométriques.

lonnes barométriques inégalement chaudes, pour faire équilibre à une même pression atmosphérique, devraient avoir d'inégales hauteurs; la plus chaude devrait être la plus haute parce qu'elle est la moins dense. Pour rendre les observations barométriques indépendantes de ces variations étrangères à la cause que l'on veut étudier, on ramène toujours la colonne de mercure à ce quelle serait si la température était zéro.

Corrections
à la mesure
des volumes
ou des densités.

Quelques mots démontreront également qu'il n'est pas absolument nécessaire d'opérer à $4^{\circ}1$ pour obtenir le volume d'un corps. Le poids de l'eau qui est déplacé par un corps ou qui remplit un vase dont nous voulons mesurer le volume, est de 29^g,535. Si on avait opéré à $4^{\circ}1$, ce volume serait de 29^{cmc}535 à $4^{\circ}1$ aussi; mais on a opéré à 20° . Or, 1^g d'eau, qui occupe à $4^{\circ}1$ un volume de 1^{cmc}, s'est dilaté et occupe à 20° un volume de 1^{cmc},0015. Le volume de l'eau est donc égal à autant de fois 1^{cmc},0015 que son poids contient de grammes, ou à $29^{\circ},535 \times 1,0015 = 29,579$. Des tables donnant la dilatation de l'eau de degrés en degrés depuis 0° jusqu'à 100, ces corrections sont toujours faciles.

CHAPITRE IV.

DILATATION DES GAZ.

146. L'étendue de la dilatation des gaz, vingt fois plus grande que celle du mercure, semblerait au premier abord devoir en faciliter l'évaluation; mais si nous nous rappelons que les gaz n'ont ni forme, ni volume qui leur soient propres, qu'obéissant à une force intérieure qui tend à écarter indéfiniment leurs molécules, ils n'ont de limites en tous sens que celles qui leur sont imposées par des obstacles extérieurs, on comprendra que de nouveaux éléments vien-

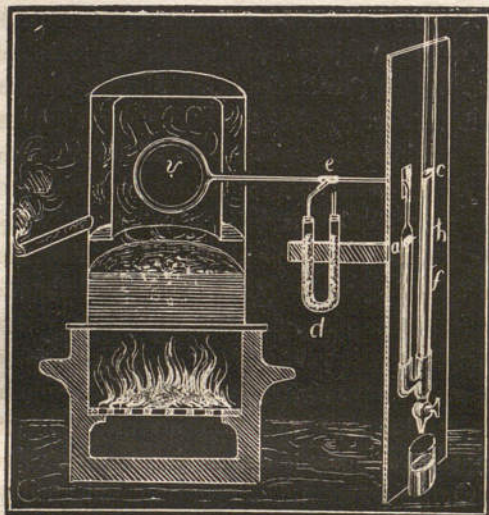
ment compliquer le problème. Les solides et les liquides , corps très-peu compressibles , conservent un volume indépendant des oscillations du baromètre , et sensiblement constant, même lorsqu'on les soumet à des pressions considérables. Les gaz , au contraire, substances éminemment compressibles , accusent par des changements appréciables dans leur volume , même les plus faibles variations de pression. Il est donc indispensable d'avoir égard à ce fait, pour ne pas attribuer à la chaleur des effets qui auraient une toute autre origine. Heureusement il est la source d'une précaution à prendre, plutôt que d'une difficulté réelle à surmonter. Bien plus , il a fourni aux physiciens un moyen simple et précis de mesurer le coefficient de dilatation des gaz. Nous avons vu , en effet , que le volume d'un gaz varie sensiblement en raison inverse de la pression qu'il supporte : supposons donc qu'un certain volume de gaz soit échauffé au point d'occuper un volume double sous une pression identique à celle à laquelle il était précédemment soumis ; si on voulait ramener ce gaz ainsi échauffé à son volume primitif , on y parviendrait aisément en doublant sa pression. On peut donc élever la température d'un gaz sans amener aucun changement dans son volume ; mais alors sa force élastique augmente dans la même proportion que l'eût fait ce volume , si rien ne se fût opposé à son expansion.

147. C'est sur cette propriété qu'est fondé le procédé que nous allons décrire d'après M. Regnault , et qui a servi à cet éminent physicien pour mesurer le coefficient de dilatation des gaz. L'appareil dont il s'est servi est représenté *fig.* 92. Il se compose d'un ballon de verre, de la capacité d'un litre environ, dont le col a été remplacé par un petit tube capillaire, et communiquant, par l'intermédiaire de ce tube, à un système de deux tubes plus larges *a c*

Mesure
de la dilatation
des gaz,
par
M. Regnault.

mastiqués à leur partie inférieure dans les deux branches

Fig. 92.



d'un robinet en fer. En versant du mercure dans les deux tubes, on isole complètement, de l'air extérieur, le gaz qui se trouve renfermé dans le ballon; et en variant les dimensions de la colonne liquide, on peut à volonté laisser, sous l'influence de la chaleur, le gaz se dilater librement, sans changement de pression, ou maintenir constant son volume en faisant varier sa force élastique. Lorsque l'on veut faire l'expérience, on introduit le ballon dans le vase métallique, on porte à l'ébullition l'eau que contient celui-ci, de manière que le ballon plongeant dans la vapeur prenne la température 100° ou voisine de 100° dépendante de la hauteur du baromètre; on remplit alors le ballon du gaz bien sec sur lequel on veut opérer, par l'intermédiaire du petit tuyau à trois branches en cuivre *e* interposé sur la longueur du tube, et on règle la double colonne de

mercure, de manière que ses deux surfaces terminales de même niveau viennent affleurer en un point *a* marqué sur le tube mis en communication directe avec le ballon. A ce moment, le gaz est à la même pression que l'air extérieur. Cette première opération terminée, on enlève l'eau bouillante, et on entoure le ballon de glace fondante sans le sortir du vase métallique. L'air, en se refroidissant, tend à se contracter, et le mercure à monter dans la branche *a* et à descendre dans l'autre. On ouvre alors le robinet, de manière à laisser écouler ce liquide jusqu'à ce que son niveau dans le premier tube soit revenu en *a*, le gaz étant à zéro. Dans cet état, la force élastique de ce gaz n'est plus égale à la pression extérieure; elle lui est inférieure d'une quantité mesurée par la différence de hauteur *h f* des deux colonnes de mercure, laquelle est d'autant plus grande que le gaz a une tendance à se contracter davantage en passant de 100° à 0°, ainsi que nous l'avons expliqué plus haut. Cette diminution de force élastique peut donc nous fournir une mesure de cette tendance, et, par suite, de l'effet qui en eût été la conséquence, si le gaz fût resté soumis à la même pression pendant toute la durée de l'expérience. On peut opérer d'une manière inverse. Le gaz est à zéro, le mercure est en *a* dans le tube *a* et en *h* dans le tube *c*. On porte ce gaz à 100°; en s'échauffant, il tend à se dilater, repousse le mercure qui descend dans *a* et remonte dans *c*. On ouvre alors le robinet, de manière à ce que la différence de hauteur des deux colonnes reste la même que quand le gaz était à zéro, et que celui-ci, par conséquent, reprenne la force élastique qu'il avait en ce moment. Le gaz se sera dilaté librement alors, et d'une quantité qui pourra être évaluée facilement, si on a eu soin préalablement de graduer le

tube *a* à sa partie supérieure et d'en comparer la capacité à celle du ballon.

L'une et l'autre de ces méthodes ont conduit M. Regnault aux résultats suivants :

Oxyde carboné.....	0,367	Acide carbonique....	0,371
Hydrogène.....	0,367	Protoxyde d'azote...	0,372
Azote.....	0,367	Cyanogène.....	0,388
Air atmosphérique...	0,367	Acide sulfureux.....	0,390

148. Le procédé que nous avons fait connaître ne donne que la dilatation apparente du gaz dans le verre ; pour en déduire sa dilatation absolue, il suffit de la correction dont nous avons parlé pour les liquides. Au reste, nous n'avons exposé ce procédé que d'une manière très-sommaire, et de manière seulement à en donner une idée ; il exige dans son application des précautions nombreuses que nous passons sous silence.

Lois
de Gay-Lussac.

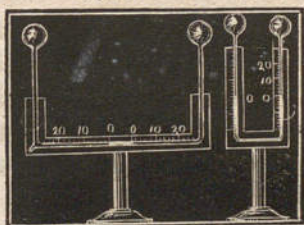
149. Le tableau précédent, comparé aux tableaux de la dilatation des liquides et des solides, nous conduit à ce résultat déjà signalé par M. Gay-Lussac, que tous les gaz se dilatent sensiblement de la même manière. La forme gazeuse semble avoir fait disparaître toute influence provenant de la nature et de la constitution moléculaire du corps. Si cette loi n'est pas complètement vérifiée, elle est du moins très-près de l'être, et elle se conserve encore assez bien sous des pressions très-différentes. Dans la pratique, et toutes les fois qu'on n'a pas besoin d'une précision extrême, on peut donc l'accepter comme vraie ; mais, dans la science, cette facilité n'est pas permise. Les lois de la nature sont simples ; mais nul phénomène n'est le produit de l'une d'elles à l'exclusion des autres ; elles se superposent, se compliquent toujours plus ou moins. Chaque partie d'un phénomène a sa raison d'être ; nulle ne peut en être négligée sans dommage, quelque minime qu'elle

soit : c'est un jalon qui sert à tracer la route des physi-
ciens au milieu des voies sinueuses et multiples de la nature.

Nous devons donc dire que les gaz ne se dilatent pas
rigoureusement tous de la même quantité ; que leur coeffi-
cient de dilatation n'est pas rigoureusement constant dans
toute l'étendue de l'échelle des températures ; que ce coef-
ficient augmente un peu quand la pression s'accroît, surtout
pour les gaz autres que l'oxygène, l'hydrogène, l'azote,
c'est-à-dire pour les gaz liquéfiables par nos procédés.

Fig. 93.

Fig. 94.



150. La dilatabilité consi-
dérable de l'air l'a fait employer
dans la construction de ther-
momètres auxquels on voulait
donner une grande sensibilité.
Le thermomètre différentiel de
Leslie, *fig. 94*, et le thermos-
cope de Rumford, *fig. 93*, sont

Thermoscope
de Rumford.Thermomètre
différentiel
de Leslie.

dans ce cas. Ces deux instruments sont formés d'un tube
recourbé en deux branches verticales terminées par deux
boules en verre très-mince ; un simple index ou une véri-
table colonne liquide sépare l'air contenu dans les deux
boules. A quelque température que l'on expose l'un de ces
instruments, le liquide y conservera sa position, si les deux
boules sont également chaudes ; mais si l'une d'elles est
plus échauffée que l'autre, immédiatement le liquide est
chassé d'une quantité correspondante vers la boule froide.

Dans les recherches physiques, les températures sont
également fournies par un thermomètre à air, ou ramenées
aux températures qui seraient indiquées dans les mêmes
conditions par ce dernier instrument. La forme qu'on lui
donne alors est analogue à celle de l'appareil, *fig. 92*.

La marche des deux thermomètres à air et à mercure

Thermomètre
à air.

n'est point concordante au-dessus de 100°, ainsi que l'indique le tableau suivant :

Thermomètre à air.	Thermomètre à mercure.
250	250,3
300	301,2
325	326,9
350	353,3

CHAPITRE V.

MESURE DES CAPACITÉS DES CORPS POUR LA CHALEUR.

151. A mesure que les corps s'échauffent et se dilatent sous l'action de la chaleur ou calorique, l'intensité de cet agent augmente en eux ; on dit généralement qu'ils absorbent des *quantités* croissantes de chaleur.

Cette absorption de la chaleur par les corps n'est pas moins variable avec la nature de ceux-ci que leur dilatation. 1^k d'eau à zéro exigera plus de calorique pour passer à 10° que ne le ferait 1^k de mercure dans les mêmes conditions. Il devient donc utile de comparer ces *capacités des corps* pour la chaleur, et cette comparaison nous sera possible, bien que nous ne connaissions rien de la *nature* de la chaleur ; car le thermomètre nous permettra toujours d'apprécier les *effets* qu'elle produit.

Capacité
des corps pour
la chaleur.

152. Lorsqu'un corps homogène est dans tous ses points à la même température, on peut admettre comme évident que la quantité de chaleur qu'il possède, uniformément répandue dans sa masse, est proportionnelle à cette masse, à son poids, à son volume ; de même ce corps, passant tout entier de cette température à une autre, prendra une nouvelle quantité de chaleur proportionnelle aussi à sa masse, à son poids, à son volume.

Influence
sur la
chaleur absorbée,

de la masse,

Il nous paraît également clair qu'un même corps exigera plus de chaleur pour passer de 0° à 20° , que pour passer de 0° à 10° . Dans nos déterminations des capacités calorifiques, il faudra donc nous mettre à l'abri de ces influences de poids et de température, pour laisser pleinement ressortir l'influence exercée sur le phénomène par la nature même du corps. Nous prendrons donc pour mesure de la *capacité calorifique des corps la quantité de chaleur que l'unité de poids (solides et liquides) ou l'unité de volume (gaz) de ces corps absorbe lorsque leur température s'élève de 1° ou de 100°* . La quantité de chaleur perdue par l'unité de masse ou de volume d'un corps, lorsque sa température s'abaisse du nombre de degrés dont elle s'était élevée, étant exactement égale à la précédente, peut lui être substituée dans la détermination qui nous occupe.

De la variation
de température.

153. Rien ne nous autorise à penser que la capacité calorifique d'un corps est constante dans toute l'étendue de son échelle thermométrique ; l'expérience, au contraire, nous montre que la chaleur absorbée par le mercure pour passer de 299° à 300° est plus grande que celle qu'il absorbe pour passer de 199° à 200° , celle-ci plus grande que la quantité de chaleur prise par la même masse de mercure pour monter de 0° à 1° . La capacité calorifique du mercure croît avec la température, et il en est ainsi pour la plupart des corps.

De la
température
initiale.

L'eau toutefois peut être rangée parmi les exceptions à cette espèce de règle. Prenons 1^k d'eau à 4° et 1^k d'eau à 30° , mélangeons-les rapidement ; la chaleur se distribuera uniformément dans la double masse ; et si nous avons opéré avec des précautions telles que rien n'ait été perdu de cette chaleur, le mélange aura exactement la température moyenne de 17° . La chaleur perdue par le kilogramme d'eau chaude, refroidi de 30° à 17° ou de 13° , aura été

prise par le kilogramme d'eau froide, et aura suffi pour en élever la température de 4° à 17° ou de 13° aussi. La capacité calorifique de l'eau est donc sensiblement constante ; la chaleur absorbée par ce liquide est proportionnelle à l'élévation de température qu'il subit aussi bien qu'à son poids. L'eau nous servira à mesurer les quantités de chaleur, à l'aide d'un procédé semblable à celui qui précède ; nous prendrons pour *unité de chaleur la chaleur absorbée par 1^k d'eau pour passer d'un degré quelconque au degré immédiatement supérieur*. La capacité calorifique de l'eau sera dès lors égale à 1.

Unité
de chaleur.

Expériences
de M. Regnault.

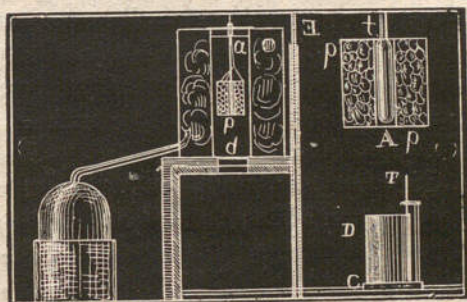
154. Les conditions à remplir pour évaluer la capacité calorifique d'un corps sont les suivantes : 1^o connaître exactement le poids du corps dont on veut mesurer la capacité calorifique, et le poids de l'eau dans laquelle on le plonge : la balance fournit ces données. 2^o Déterminer avec précision, au moment de l'immersion, et la température du corps et la température de l'eau ; puis, après l'immersion, la température de celle-ci. 3^o Éviter toute cause de déperdition de chaleur, ou tenir compte avec soin de la chaleur perdue pendant l'opération.

Les déterminations les plus précises sont dues à M. Regnault. Nous allons décrire sommairement son procédé et l'appareil dont il s'est servi.

Le corps pesé était renfermé dans l'enceinte annulaire *pp* d'un petit panier formé de deux enveloppes concentriques en toile métallique. Ce panier était suspendu lui-même, à l'aide d'un fil de soie, dans l'enceinte intérieure d'un vase en fer-blanc également formé de deux enveloppes, et dont l'enceinte extérieure *c c* était remplie de vapeur d'eau bouillante fournie par un alambic. L'enceinte intérieure, fermée en haut et en bas, composait une espèce d'étuve où le corps s'échauffait jusqu'à un degré voisin de 100° . Un

thermomètre dont le réservoir remplissait l'enceinte A indiquait cette température avec une extrême précision.

Fig. 95.

Appareil de
M. Regnault.

L'eau était renfermée dans un vase cylindrique en laiton mince et poli D, et porté par un charriot mobile C. Un thermomètre T indiquait la température de l'eau qu'un écran formé par une lame d'eau préservait du rayonnement de l'alambic.

Prenons un exemple : le fer placé dans le panier p pèse 50 g, sa température indiquée par le thermomètre t est de 98° ; l'eau du vase pèse 243 g ; elle est à 10° . Nous soulevons l'écran E, nous poussons le charriot au-dessous de d , nous débouchons l'enceinte ad ; nous faisons glisser le panier dans l'eau, et ramenons le charriot dans sa position première. Le fer chaud se refroidit en échauffant l'eau ; nous suivons les indications du thermomètre T, et quand il est stationnaire, que l'équilibre de température s'est établi, la température de l'eau est de 12° . Le fer est donc descendu de 98° à 12° , soit de 86° ; la quantité de chaleur qu'il a perdue est de $C \times 86 \times 0^k050$, C représentant la capacité moyenne du fer entre 12° et 98° . La quantité de chaleur gagnée par l'eau, au contraire, est égale à $2 \times 0^k,243$. Si ces deux quantités de chaleur sont égales, on a

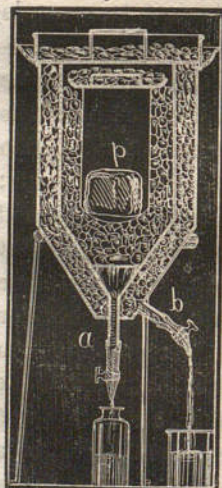
$C \times 86 \times 0,050 = 2 \times 0,243$, d'où $C = \frac{2 \times 0,243}{86 \times 0,050} = 0,113$, capacité calorifique du fer.

Tel est en gros le procédé suivi. Dans une expérience précise, il faudrait tenir compte de la chaleur fournie par le panier, de la chaleur prise par le vase D ou perdue par l'évaporation de l'eau et par voie de rayonnement.

Capacité
des atomes.

155. Dans le beau travail d'où nous avons extrait ce qui précède, M. Regnault a confirmé et étendu une loi remarquable trouvée par Dulong. *La capacité calorifique des atomes des corps simples est sensiblement la même pour tous ces corps.* M. Regnault a ajouté, en outre, que la capacité calorifique des atomes composés ayant même formule est aussi sensiblement la même. Tous les oxydes RO ont la même capacité atomique ; il en est ainsi des oxydes R^2O , R^3O des chlorures Rcl , Rcl^2 et de tous les sels minéraux. Si ces lois ne se vérifient pas d'une manière rigoureuse, on aperçoit du moins, en dehors du phénomène, des causes

Fig. 96.



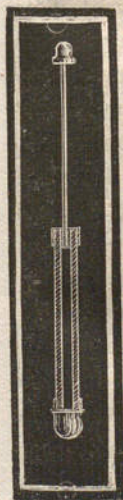
auxquelles on est en droit d'attribuer les écarts observés : tel est, par exemple, l'état variable d'agrégation sous lequel les corps se présentent à nous, et dont l'influence a été démontrée d'une manière directe.

156. Bien avant M. Regnault, Lavoisier et Laplace avaient déjà mesuré avec exactitude la capacité calorifique d'un assez grand nombre de corps. L'appareil dont ils se servaient se composait de trois vases concentriques ; ils plaçaient dans le vase intérieur le corps chaud soumis à l'expérience, dans le vase moyen une en-

ceinte de glace pilée, à 0°, et destinée à absorber toute la chaleur perdue par le corps. Une seconde enceinte de glace pilée, à 0°, et placée dans le vase extérieur, préservait la première de la chaleur du dehors. De cette manière, cette glace recevait toute la chaleur du corps, mais ne recevait qu'elle. En recueillant donc l'eau provenant de sa fusion, et comparant le poids de cette eau avec le poids du corps, et son abaissement de température, on en pouvait déduire la mesure proportionnelle de la capacité calorifique du corps.

157. La détermination de capacités calorifiques des gaz est due à MM. de la Roche et Berard. Ces deux habiles physiciens faisaient passer un volume déterminé de leurs gaz, dont la température leur était connue, au travers d'un serpentín plongé dans une masse d'eau froide également connue. De l'élévation plus ou moins grande de la température de cette eau, MM. de la Roche et Berard concluaient à la capacité cherchée.

Fig. 97.



La capacité calorifique d'un même gaz dépend de l'élasticité de ce gaz ; elle décroît quand cette élasticité augmente. C'est pour cette cause que les gaz s'échauffent considérablement quand on les comprime fortement à l'aide du briquet à air, par exemple ; l'effet peut être porté jusqu'à un point tel, que des matières combustibles prennent feu au milieu d'une masse d'air ainsi brusquement condensée. Réciproquement, un gaz s'échappant avec impétuosité d'un réservoir où on le tenait soumis à une haute pression, produit par son expansion un froid très-intense : c'est le seul procédé qui ait permis d'obtenir l'acide carbonique à l'état solide.

Capacité
calorifique des
gaz.

Variation
de la capacité avec
la pression.

CHAPITRE VI.

FUSION ET SOLIDIFICATION DES CORPS.

Fusion
des corps.

138. La température des corps s'élevant graduellement, il arrive un moment où l'on voit apparaître un nouveau phénomène : ces corps changent d'état, ils fondent. Tous les corps solides peuvent, sans doute, ainsi changer d'état ; du moins si nous ne sommes pas parvenus à les fondre tous, sommes-nous en droit de l'attribuer à l'insuffisance des moyens dont nous pouvons disposer. A mesure, en effet, que nous en acquérons de plus puissants, nous retirons de nouveaux corps de la liste de ceux qui nous ont jusqu'à présent résisté. Dans un grand nombre de cas, la fusion se produit d'une manière graduelle : le fer, par exemple, est pâteux long-temps avant d'être complètement liquide ; il en est de même du verre et des divers émaux. Dans beaucoup de corps, cependant, le passage de l'état solide à l'état liquide se fait d'une manière brusque, la température à laquelle le corps commence à n'être plus solide coïncidant sensiblement avec la température à laquelle il est complètement liquide. L'eau jouit de cette propriété à un degré remarquable ; à 0°, elle est encore solide, à 0°, elle est déjà liquide : le changement d'état s'y produit sans changement de température.

Constance
des conditions
de température
au milieu
desquelles
s'effectue
la fusion.

139. Quoi qu'il en soit, dans les conditions les plus diverses, les mêmes phénomènes apparaîtront, dans un même corps, toujours exactement aux mêmes températures. Le fer, à quelque foyer de chaleur qu'il soit exposé, commencera à devenir pâteux lorsqu'il aura atteint un degré toujours invariable ; sa fusion sera complète toujours au

même degré. Cette constance du phénomène devient d'autant plus nette et plus évidente qu'il est lui-même plus tranché, mieux limité ; aussi, lorsqu'on le décrit dans les traités de physique, a-t-on particulièrement en vue l'eau qui peut servir de type en ce cas. La glace fond partout et toujours à 0° , le phosphore à $44^{\circ}2$, la cire à 62° , l'alliage de d'Arcet à 96° , le soufre à 115° , l'étain à 235° , le bismuth à 270° , le plomb à 332° , le zinc à 423° .

160. Si la glace, en présence du foyer le plus ardent, conserve toujours la même température tant qu'elle n'est pas entièrement fondue, et si l'eau qui en découle est encore au même degré, que devient la chaleur qui a été évidemment absorbée par ce corps ? Elle passe à l'état latent. Tout corps arrivé à son point de fusion, absorbe, pour fondre, de la chaleur *latente* employée tout entière à produire le changement d'état sans changement de température. Prenez 1^k d'eau à $79^{\circ},25$, mélangez-le avec 1^k de glace à 0° , vous aurez 2^k d'eau à 0° . La glace a donc absorbé $79,25$ unités de chaleur pour fondre seulement. Prenez 3^g de glace à zéro, plongez-les dans une masse d'eau à 12° , pesant $133^g,9$, et que vous agiterez jusqu'à ce que la glace soit entièrement fondue : si la chaleur absorbée par la glace a été fournie tout entière par l'eau, la température finale du mélange sera de 10° . L'eau aura donc perdu $133,9 \times 2 = 267,8$ unités de chaleur ; les 3^g d'eau de la glace fondue en auront pris 30 pour passer de 0° à 10° ; les $237,8$ restant auront été absorbées par la glace pour fondre sans changement de température, et chaque gramme en aura dissimulé $237,8 : 3 = 79,27$. C'est en opérant ainsi avec toutes les précautions convenables que MM. La Provostaye et Desains ont déterminé la chaleur latente de la glace, et l'ont trouvée égale à $79,27$.

Chaleur latente
de fusion.

Chaleur latente
de la glace.

Congélation
des liquides.

161. Le phénomène inverse, ou la congélation des liquides, ne se fait pas toujours dans des conditions aussi nettement définies que la fusion des solides. Versez de l'eau dans un tube étroit, abandonnez-la à un froid très-vif en la préservant de toute cause d'agitation, vous la verrez descendre à 5° , 10° et même 12° au-dessous de 0° avant de se congeler. Mais si vous lui communiquez le plus petit ébranlement, immédiatement le changement d'état s'effectue dans une partie de la masse, qui revient brusquement à 0° . De ce fait nous pouvons tirer une double conséquence : la première, c'est que l'inertie des molécules occasionne le retard observé dans la congélation du liquide. Au-dessous de 0° ces molécules sont sans doute individuellement dans les conditions favorables à l'état solide ; mais pour que cet état nous apparaisse, il faut qu'elles s'orientent, qu'elles tournent plus ou moins sur elles-mêmes pour mettre en rapport les faces d'attraction *maxima*, et c'est ce mouvement que le froid à lui seul n'est pas toujours capable de produire.

Retour
à l'état libre
de la chaleur
latente.

Le retour du liquide à 0° par la congélation d'une partie de sa masse, nous montre, de plus, que l'eau, en reprenant l'état solide, remet en liberté la chaleur que la glace avait absorbée pour fondre. Cette chaleur libre élève la température de toute la masse, et la portion qui s'en est solidifiée est telle, que le liquide remonte à 0° , température qu'elle ne pourrait dépasser sans que l'effet produit ne fût détruit de nouveau.

Mesure
des chaleurs
latentes.

162. On peut donc évaluer la chaleur latente de fusion d'un corps, soit en mesurant la chaleur absorbée par ce corps pour fondre, soit en mesurant la chaleur que, fondu, il dégage en se solidifiant. Le premier procédé a été employé pour l'eau et les corps qui fondent à une basse température ; le second est seul applicable aux autres corps.

C'est par ce dernier moyen que M. Person a trouvé pour la chaleur latente du phosphore 4,71, du soufre 9,17, de l'étain 14,30, du bismuth 12,40, du plomb 5,15, du zinc 27,46, ... nombres beaucoup plus faibles que la chaleur latente de l'eau.

163. Les corps prennent toujours quelque part la chaleur qui leur est nécessaire pour changer d'état. Si vous mettez de la glace et du sel en contact, ces deux corps, par suite des affinités qui se développent entre eux, se fondront même au milieu d'un air au-dessous de 0°. Ne recevant pas du dehors la chaleur dont ils ont besoin, ils la prendront à eux-mêmes; une partie de leur chaleur libre passera à l'état latent, leur température baissera jusqu'à 15 ou 20° au-dessous de zéro. C'est à l'aide de ce froid artificiel que l'on prépare les glaces dans les cafés. On peut même faire de la glace en été sans glace. Prenons un vase annulaire, versons-y de l'eau, et introduisons-le dans un sceau dans lequel nous mélangerons 0^k80 d'acide chlorhydrique ordinaire et 1^k20 de sulfate de soude; au bout de 20 ou 25 minutes, notre eau sera congelée.

164. Le changement d'état est, au reste, toujours accompagné d'un changement de volume. Presque tous les corps se contractent en se congelant; les canons de soufre que l'on rencontre dans le commerce présentent, à l'une de leurs extrémités, une cavité due au retrait de la matière au moment de sa solidification. L'eau, la fonte et le bismuth, font toutefois exception à cette règle : ils se dilatent en se congelant; aussi les médailles en fonte présentent-elles beaucoup plus exactement la forme du moule quelles ne le feraient sans cela. La dilatation de l'eau est énorme dans ce cas; elle s'élève jusqu'au quatorzième de son volume. Pour s'opposer à cette expansion, il faudrait une force capable de comprimer la glace de un quatorzième, force

Mélanges
réfrigérants.

Force expansive
de la glace.

qui, en raison du faible degré de compressibilité des solides, serait prodigieuse; aucun vase ne saurait lui résister. L'eau en se congelant brise les pierres qui s'en laissent pénétrer.

Action du froid
sur les végétaux.

165. On attribue quelquefois à la force expansive de la glace les désastres que les froids de l'hiver produisent sur un grand nombre de plantes. Cette interprétation est fautive ou tout au moins exagérée. Beaucoup de plantes continuent à vivre, qui sont tapissées chaque année d'une multitude de glaçons à l'intérieur; d'autres meurent avant d'avoir atteint la température 0°. C'est là un phénomène purement physiologique. De même que la température du corps de l'homme ne saurait descendre impunément au-dessous d'une certaine température peu différente même de la température normale 36 ou 37°, de même les plantes ne peuvent, sans périr, se refroidir au-delà d'un certain terme variable pour chaque plante selon sa nature.

CHAPITRE VII.

FORMATION ET CONDENSATION DES VAPEURS.

166. Le second changement d'état des corps, leur passage de l'état liquide à l'état gazeux, est loin de se produire dans des conditions aussi nettement définies que la fusion des solides. Il semble que l'état liquide ne soit, pour certains corps, qu'un état transitoire sur notre globe, et que la matière y tende sans cesse à le quitter pour l'état gazeux. Du moins observe-t-on qu'un très-grand nombre de liquides se transforment spontanément en vapeurs aux températures les plus diverses, et quelquefois les plus froides.

Évaporation.

Abandonnons de l'eau, de l'alcool, de l'essence, ... à l'air libre, nous verrons peu à peu ces liquides diminuer de vo-

Fig. 98.



lume, puis disparaître entièrement. L'air les dissout, disait-on jadis, comme l'eau le fait du sucre. Mais introduisons de l'éther dans l'espace vide au-dessus de la colonne barométrique, et, tout aussitôt qu'elle y sera parvenue, cette colonne sera brusquement déprimée de *a* en *b* comme si nous y eussions laissé pénétrer des bulles d'air. Une portion du liquide se change alors en une espèce de gaz invisible; elle se transforme en *vapeurs*.

Les pluies nous fournissent d'incontestables exemples de l'énorme quantité d'eau répandue dans l'atmosphère à l'état de vapeur. Introduisez dans l'air le plus sec une carafe pleine d'eau glacée, aussitôt vous verrez sa surface se couvrir de gouttes d'eau provenant

du retour de cette vapeur à l'état liquide. De même, plongez l'extrémité *c* de votre tube rempli de vapeur d'éther dans un mélange réfrigérant, vous verrez bientôt le liquide s'y reformer, et tout l'éther même passer de *b* en *c*.

167. Plusieurs substances, comme l'eau, l'alcool, l'éther, donnent des vapeurs à toute température; la glace même s'évapore et disparaît ainsi quelquefois sur nos chemins, sans passer préalablement par l'état liquide, au moins en apparence. Le camphre, l'arsenic, l'iode, sont dans ce cas. D'autres ne commencent à en fournir qu'à une certaine température qui est 10° ou 12° au-dessous de 0° pour le mercure, 30° environ au-dessus de 0° pour l'acide sulfurique ordinaire.

Réciproquement, des vapeurs peuvent repasser à l'état liquide à toute température. La neige, le givre, les cristallisations qui apparaissent l'hiver sur les vitres de nos appartements, nous montrent même que des vapeurs

Point
de volatilisation.

Point
de condensation.

peuvent repasser directement à l'état solide, sans s'arrêter à l'état liquide intermédiaire.

Le phénomène de l'évaporation n'est pas détruit par la présence, au-dessus d'un liquide, d'un gaz quelque dense qu'il soit; il en est seulement ralenti dans sa marche. Nous l'étudierons donc d'abord dans le vide, en dehors de toute cause de complication extérieure.

Fig. 99.



Vapeurs
dans le vide.

Maximum
de
tension
des vapeurs.

168. Prenons un long tube de verre fermé à l'un de ses bouts, remplissons-le avec soin de mercure, et le renversons dans une cuvette à mercure très-profonde. Le mercure descendra dans le tube et s'y maintiendra à une hauteur égale à celle du baromètre. Introduisons-y alors un excès d'éther; une dépression très-marquée aura lieu, qui pourra servir de mesure à la force élastique de la vapeur formée. Or, si nous soulevons ou abaissons le tube, de manière à accroître ou restreindre l'espace occupé par la vapeur, nous verrons, contrairement à ce qui aurait lieu pour un gaz ordinaire, la colonne de mercure conserver toujours la même hauteur, et accuser conséquemment qu'aucune modification n'a eu lieu dans la force élastique de la vapeur. Le volume de l'éther non vaporisé varie, au contraire, pendant ce temps, diminuant quand on élève le tube, augmentant quand on l'abaisse. On dit alors que la vapeur est à son *maximum de tension*, que l'espace qu'elle occupe est *saturé*. Ce phénomène remarquable persiste tant que l'espace offert à la vapeur n'est pas assez grand pour qu'il faille

tout le liquide en vapeurs pour le remplir. Au-delà, il change pour se rapprocher de celui qui est présenté par

les gaz ordinaires. L'élasticité des vapeurs ne peut donc pas dépasser un certain terme qu'elle atteint toujours, ou vers lequel elle tend sans cesse, tant qu'il reste du liquide non évaporé; mais elle peut descendre au-dessous, et alors les vapeurs se comportent comme les gaz, s'éloignant d'autant moins de la loi de Mariotte qu'elles sont plus dilatées.

169. On ne saurait conclure de ces faits à une différence fondamentale existant entre les gaz et les vapeurs. Si, dans les gaz, en effet, la force élastique augmente à mesure que son volume est de plus en plus resserré, il arrive aussi un moment où cette force élastique acquiert une valeur *maxima* qu'on ne saurait lui faire dépasser, une diminution ultérieure de son volume amenant alors la liquéfaction d'une partie du gaz. La seule différence réelle existant entre les gaz et les vapeurs consiste donc en ce que, aux températures ordinaires, les vapeurs peuvent se trouver naturellement à leur *maximum* de tension, tandis que les gaz en sont plus ou moins éloignés; et comme le refroidissement seul pourrait à la rigueur les y ramener, tout se réduit en définitive à une question de température.

170. Lorsque plusieurs gaz sont introduits simultanément dans une même enceinte, sans qu'ils puissent y réagir chimiquement l'un sur l'autre, ils s'y mélangent intimement, quelle que soit leur densité, et le mélange est identiquement le même dans toutes les parties de l'espace qu'il occupe. Si le phénomène présenté par la grotte du chien ou les cuves en fermentation paraît en contradiction avec ce principe, c'est que les gaz en repos mettent toujours un certain temps à se mélanger, et que, dans les deux cas que nous venons de citer, l'acide carbonique se renouvelle dans les couches inférieures à mesure qu'il se répand dans les couches supérieures de l'air. D'un autre côté, dans un mélange gazeux, les pressions des

Vapeurs dilatées.

égalité
des gaz
et des vapeurs.

Analogie
des gaz
et des vapeurs.

Mélange
des gaz.

gaz qui le composent s'ajoutent intégralement, en sorte que la force élastique du mélange est égale à la somme des forces élastiques qu'aurait chaque gaz s'il occupait seul l'espace offert au mélange.

Mélange
des gaz
et des vapeurs.

Appareil
de Gay-Lussac.

171. Les vapeurs se comportent de la même manière, ainsi qu'on peut s'en convaincre à l'aide de l'appareil de Gay-Lussac. Cet instrument se compose d'un tube de verre fermé à sa partie supérieure, et muni à sa partie inférieure d'une douille à robinet en fer. Un tube d'un diamètre plus petit ouvert à l'un de ses bouts est soudé par l'autre à la partie inférieure du premier tube. L'appareil étant bien sec, nous y introduisons du mercure, de manière que le niveau s'y élève en *a b* dans les deux branches. La force élastique de l'air est, à ce moment, égale à la pression extérieure. Nous versons alors de l'éther en *b*, nous ouvrons le robinet; le mercure s'écoule, descend plus vite en *b* qu'en *a*; l'éther arrive bientôt en *d*, et une portion en pénètre dans le gros tube; à ce moment nous fermons le robinet. Dès que l'éther arrive dans l'air contenu dans le gros tube, nous voyons la colonne de mercure se déplacer sous l'accroissement de pression due à la vapeur, et ce mouvement, qui dure un certain temps, s'arrête seulement quand l'air est saturé. Nous versons alors dans la branche ouverte, de manière à ramener l'air à son volume et à son élasticité primitives, du mercure qui s'élèvera jusqu'en *c* dans l'autre branche. L'accroissement de pression due à la tension de la vapeur d'éther, mesurée par la colonne *b c*, se trouvera sensiblement égale à la tension maxima de la vapeur d'éther introduite seule et à la même température dans le vide barométrique. Même résultat serait obtenu avec un liquide quelconque n'attaquant pas le mercure. L'air humide suit

Fig. 100.

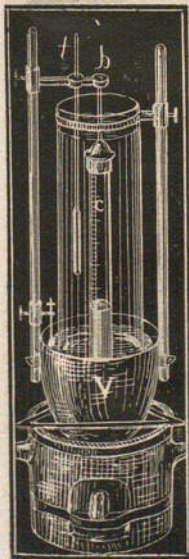


sensiblement la loi de Mariotte, comme l'air sec, tant que la vapeur qu'il contient n'a pas atteint son maximum de tension. A partir de ce moment, l'air continue à obéir à la même loi, tandis que la vapeur conserve la même force élastique.

172. Cette analogie des gaz et des vapeurs nous permet de déterminer par des procédés analogues les densités de ces fluides.

La densité d'un gaz s'obtient en pesant un volume connu du gaz à une température et sous une pression déterminées, et en comparant ce poids avec le poids d'un égal volume d'air à la même température et sous la même pression. C'est ainsi qu'on agit avec les vapeurs. Deux procédés sont mis en pratique suivant la température à laquelle s'effectue l'ébullition de la substance sur laquelle on veut expérimenter.

Fig. 101.



Dans le procédé de Gay-Lussac, on opère sur un poids déterminé du liquide, et on mesure le volume de vapeur qu'il fournit. Dans le procédé de M. Dumas, au contraire, le volume de la vapeur est déterminé à l'avance; on en mesure ultérieurement le poids.

173. Une éprouvette graduée est remplie de mercure et renversée sur un bain de mercure contenu dans un vase en fonte; on remplit du liquide une petite ampoule, on en prend le poids, et on l'introduit dans l'éprouvette où elle surnage le mercure; on environne celle-ci d'un manchon plein d'eau, et on chauffe le tout sur un fourneau. Bientôt la dilatation du

Densité
des gaz.Densité
des vapeurs.Procédé
de
M. Gay-Lussac.

liquide fait crever l'ampoule, la vapeur se forme et déprime le mercure. L'éprouvette graduée permet de lire le volume C de la vapeur ; la hauteur h du mercure dans l'appareil, retranchée de la hauteur du baromètre au moment de l'expérience, donne la force élastique H de cette vapeur ; le thermomètre t en indique la température ; enfin, le poids de la vapeur est connu par le poids p du liquide, si tout celui-ci s'est bien vaporisé. Comme on sait d'ailleurs qu'un litre d'air à 0° , sous la pression 760, pèse 1 $\frac{2}{3}$, on calculera aisément le poids P d'un volume C d'air sous la pression H et à la température t ; $\frac{P}{p}$ sera la densité de la vapeur.

Dans le procédé de M. Dumas, on introduit la substance en excès dans un ballon dont on étire

Fig. 102.



Procédé
de M. Dumas.

le col en pointe, et que l'on plonge dans un bain d'huile ou dans un bain métallique pouvant supporter une haute température. On chauffe jusqu'à ce que l'ébullition ait lieu, ce que l'on reconnaît au jet de vapeur qui s'échappe par la pointe du ballon. Le jet cessant, on ferme la pointe à la lampe ; on ôte le ballon, on le pèse ; son poids ainsi ob-

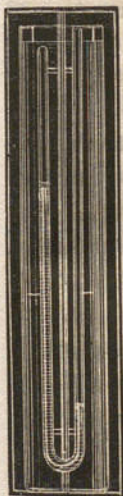
tenu, comparé au poids du ballon vide, fait connaître le poids de la vapeur remplissant, dans les conditions de l'expérience, le ballon dont on mesure le volume par les procédés ordinaires.

CHAPITRE VIII.

MESURE DES TENSIONS DES VAPEURS.

174. La force élastique *maxima* d'une vapeur, variable avec la nature du liquide d'où s'échappe cette vapeur, varie également avec la température. Prenons un long tube recourbé en deux branches égales et parallèles, dont l'une est fermée à son extrémité; remplissons celle-ci de mercure, introduisons-y de l'éther, et plongeons notre appareil dans un long manchon en verre plein d'eau chaude. Dès que l'impression de la chaleur se sera fait sentir au liquide et à sa vapeur, nous verrons le mercure descendre rapidement et rendre ainsi sensible l'étendue de l'accroissement de force élastique éprouvée par la vapeur. L'élasticité des gaz aussi croît bien avec leur température, mais dans une proportion beaucoup moindre. Il ne s'agit plus ici d'un simple effet de dilatation; à mesure que la température monte, de nouvelles quantités de vapeur viennent s'ajouter aux premières: la chaleur produit ce que n'a pu faire la simple diminution du volume de la vapeur.

Fig. 103.



viennent s'ajouter aux premières: la chaleur produit ce que n'a pu faire la simple diminution du volume de la vapeur.

175. L'expérience précédente peut nous conduire à un résultat important. Remplaçons l'éther par l'eau dans notre tube, et plongeons celui-ci dans l'eau bouillante; la colonne de mercure déprimée le sera jusqu'au niveau du mercure dans la branche ouverte. La force élastique maxima de la vapeur d'eau est donc, à la température d'ébullition de ce même liquide, précisément égale à la pression atmosphérique.

Variation
du maximum
de tension
des vapeurs
avec
leur température.

Tension maxima
de la vapeur
d'un liquide en
ébullition.

Il en est de même pour tous les liquides. Ce phénomène, dont nous donnerons une explication facile, trouvera une application importante dans ce chapitre.

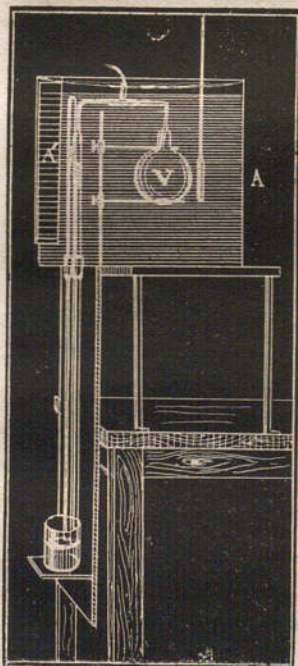
Mesure
des tensions
maxima
des vapeurs.

176. La mesure des forces élastiques des vapeurs a été, à cause de son importance tant pour la science que pour l'industrie, l'objet d'un grand nombre de recherches. Dalton, Gay-Lussac, Dulong, Arago et autres éminents physiciens, s'en sont occupés successivement. Ne pouvant faire ici l'histoire de la science, nous nous en tiendrons aux expériences les plus récentes dues à M. Regnault.

177. M. Regnault a fait principalement usage de deux appareils destinés, l'un aux basses températures, l'autre

Fig. 104.

Appareil
de M. Regnault
pour les basses
températures.



aux températures élevées. Le premier, qui a de l'analogie avec l'appareil qui lui a servi à mesurer la dilatation des gaz, se compose d'un ballon V contenant une certaine quantité de liquide sur lequel on veut expérimenter, et dont le col effilé est réuni à un tube barométrique par l'intermédiaire d'un tube capillaire portant en son milieu un petit tube de cuivre à trois branches qui, tout en faisant communiquer entre elles les deux parties précédentes de l'appareil, sert aussi à les mettre en relation avec une machine pneumatique. Un second tube barométrique garni de mercure comme un véri-

table baromètre, est dressé parallèlement au premier, et plonge dans la même cuvette à mercure. Enfin, toute la partie supérieure de cet appareil est logée dans une caisse en zinc capable de contenir de l'eau, et garnie antérieurement d'une glace A' qui permet d'apercevoir les parties supérieures de nos deux tubes.

L'appareil étant ainsi disposé, on enlevait du ballon et du tube en relation avec lui tout l'air qu'en pouvait soustraire la machine; on soulevait en même temps la cuvette, de manière à faire pénétrer le mercure jusque dans le tube à trois branches, et on fermait le petit robinet qui se trouvait immédiatement à gauche de la branche verticale. Toute trace d'air était ainsi chassée de cette partie gauche de l'instrument. On portait alors à l'ébullition le liquide contenu dans le ballon V, et les vapeurs qui s'en dégageaient, entraînant l'air du ballon, l'en purgeaient également. Après ces préparatifs, il ne s'agissait plus, après avoir fermé à la lampe la branche verticale, et rétabli la communication entre le tube et le ballon, que de porter la vapeur aux diverses températures, et de comparer les hauteurs du mercure dans les deux tubes barométriques voisins. Tous deux sont vides d'air; mais dans l'un se trouve de la vapeur dont la force élastique déprime le mercure sur lequel elle agit, d'une quantité qui sert de mesure à cette force élastique. M. Regnault a également opéré d'une autre manière: au lieu d'introduire directement le liquide dans le ballon, il en remplissait une petite ampoule de verre fermée à la lampe, et plaçait celle-ci dans le ballon, avant d'en étirer le col et de le souder à son tube capillaire. Puis, l'appareil étant monté comme l'indique la *fig. 104*, il en soustrait des quantités variables d'air, fermait à la lampe la branche verticale, et enveloppait de glace le ballon V. La différence des hauteurs des deux colonnes de mercure,

comparée à la température des diverses parties de la masse d'air restant, lui permettait de calculer, à l'aide du coefficient connu de dilatation de l'air, la force élastique de cet air à une température quelconque. La glace était alors retirée, et des charbons ardents placés sous le ballon pour faire crever l'ampoule et mettre en liberté le liquide qu'elle renfermait. Ce liquide fournissait des vapeurs dont la force élastique augmentait celle de l'air; la dépression du mercure faisait connaître, à une température donnée, la force élastique du mélange: le calcul avait fourni la force élastique de l'air seul à cette même température, la différence représentait l'élasticité de la vapeur.

Les températures supérieures à 0° étaient obtenues avec de l'eau que l'on échauffait ou maintenait chaude à l'aide d'une lampe à alcool placée au-dessous de la caisse, ou bien que l'on refroidissait avec des fragments de glace que l'on y jetait de temps en temps. Pour les températures inférieures à 0° , on remplaçait la caisse en zinc par une cloche en verre, et l'eau pure par une dissolution concentrée de chlorure de calcium dans laquelle on projetait des fragments de glace qui en abaissaient la température, ou par du chlorure de calcium cristallisé mélangé couche par couche avec de la glace pilée.

Tension
des vapeurs
dans
l'air ou les gaz.

178. Par ces deux modes d'expérimentation si différents en apparence, M. Regnault a trouvé des valeurs égales pour la force élastique d'une même vapeur à d'égales températures, ce qui prouve nettement ce que nous avons avancé (chapitre VII), que la force élastique d'une vapeur est sensiblement la même dans l'air et dans le vide.

Tension
de la vapeur
dans un espace
inégalement
chaud.

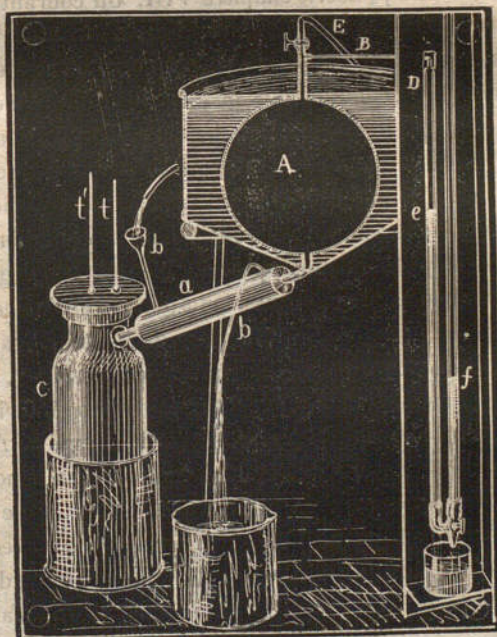
179. Toute la vapeur soumise à l'expérience ne se trouvait pas toujours à la même température. Aux températures inférieures à 0° , le ballon seul était refroidi. Cette particularité ne changeait rien à l'exactitude des détermi-

nations. L'équilibre des forces élastiques s'établit toujours dans une masse gazeuse; et comme la tension maxima de la vapeur, dans la portion froide de l'espace qu'elle occupe, ne saurait dépasser une certaine valeur qui dépend de la température de cet espace, et que l'on veut précisément mesurer, c'est cette force élastique même que possède encore la vapeur dans l'espace chaud où elle se trouve alors dilatée. C'est sur ce principe qu'est fondé le condenseur de Watt.

Condenseur
de Watt.

180. Les expériences précédentes ne peuvent servir à mesurer la force élastique maxima de la vapeur qu'à des températures peu supérieures aux températures ordinaires de l'atmosphère. Pour les températures plus élevées,

Fig. 105.



Appareil
de M. Regnault
pour les hautes
températures.

M. Regnault a eu recours à un appareil employé déjà par

MM. Petit et Dulong, et fondé sur ce que la force élastique maxima d'un liquide bouillant est précisément égale à la pression que supporte ce liquide.

Voici l'appareil tel qu'il a été modifié par M. Regnault. Une chaudière C de cuivre, posée sur un fourneau et dans laquelle plongent, à diverses profondeurs, plusieurs thermomètres, communique, à l'aide d'un tube de cuivre enveloppé d'un manchon *a*, avec une grande sphère creuse A, plongée au milieu d'une masse d'eau à la température de l'air extérieur. Cette sphère communique, d'une part, avec une machine pneumatique, ou une pompe foulante, par l'intermédiaire d'un tube à robinet fermant bien E, et, de l'autre, par l'intermédiaire du tube B, avec le système des deux tubes *e f*, décrit chapitre VIII. Un courant d'eau froide traversait continuellement le manchon *a* de bas en haut. On soutirait de l'air du vase A, ou on y en condensait, et on chauffait la chaudière de manière à produire l'ébullition du liquide qu'elle contenait, sous des pressions variables. A mesure qu'elle se formait, la vapeur se condensait par l'action réfrigérante de l'eau du manchon ; le liquide qui en résultait retombait dans la chaudière, en sorte que le phénomène acquérait bientôt un degré de régularité qui se conservait aussi long-temps que l'exigeaient les mesures à prendre. La différence de hauteur des deux colonnes de mercure *e* et *f* indiquait si les pressions, identiques en *e*, en A et en C, étaient supérieures ou inférieures à la pression atmosphérique ; les thermomètres *t*, *t'* donnaient la température du liquide, température à laquelle la force élastique maxima de la vapeur était égale à la pression en C ou en *e*. Les expériences faites avec cet appareil n'ont plus de limites que celles provenant du défaut de résistance des parties qui le composent, et du défaut de

hauteur du tube *f*. En le modifiant dans ce sens, M. Regnault a pu aller jusqu'à 27 atmosphères.

Nous donnons ici des tableaux résumés des résultats qu'il a obtenus pour l'eau. Les tensions des autres liquides n'ayant pas encore reçu d'applications industrielles, on n'en a pas formé de tables.

Tensions de la vapeur d'eau en mm de mercure.

TEMPÉRAT ^s .	TENSIONS.	TEMPÉRAT ^s .	TENSIONS.	TEMPÉRAT ^s .	TENSIONS.
30°	0,4	25°	23,5	65°	187
20	0,8	30	31,6	70	233
10	2,0	35	41,8	75	288
0	4,6	40	55	80	355
5	6,5	45	71	85	433
10	9,2	50	92	90	525
15	12,7	55	117	95	634
20	17,4	60	149	100	760

Tensions de la vapeur d'eau en atmosphères de 760 mm de mercure.

TEMPÉRAT ^s .	TENSIONS.	TEMPÉRAT ^s .	TENSIONS.	TEMPÉRAT ^s .	TENSIONS.
100°	1	153°0	5	200°5	15
112,2	1,5	160,2	6	214,7	20
121,4	2	166,5	7	226,3	25
128,8	2,5	172,1	8	236,2	30
135,1	3	177,1	9	244,8	35
145,4	4	181,6	10	252,6	40

181. Partant de ce fait, que les forces élastiques maximales des liquides à leur température d'ébullition sont égales entre elles et à la pression atmosphérique, Dalton avait

Loi de Dalton.

supposé qu'elles étaient encore égales à des températures également éloignées de leur point d'ébullition, en sorte qu'étant connues la force élastique de l'eau aux diverses températures et la température d'ébullition d'un liquide, on pourrait en conclure les forces élastiques de la vapeur de ce liquide à toute température. Cette loi n'est pas vraie; elle s'approche cependant beaucoup de la vérité pour certains liquides très-volatils, tels que l'éther, l'alcool, le sulfure de carbone, et pourrait être utile dans quelques cas. Son inexactitude diminue singulièrement son importance philosophique.

CHAPITRE IX.

ÉBULLITION, CHALEUR LATENTE DE VAPORISATION.

Ébullition.

182. Lorsqu'un vase contenant de l'eau, par exemple, est en présence d'un foyer de chaleur, ses parois s'échauffent d'abord et transmettent ensuite la chaleur qu'ils ont reçue aux couches liquides en contact avec elles. Celles-ci se dilatent, deviennent moins denses, s'élèvent dans les régions supérieures de la masse liquide, et sont remplacées par des couches froides qui s'échaufferont à leur tour. Ces doubles courants ascendants et descendants peuvent être rendus visibles par de la sciure de bois ou d'autres corps dont la densité diffère peu de celle de l'eau. L'eau ayant ainsi atteint une certaine température, on voit apparaître, sur les parois échauffées du vase, de petites bulles qui croissent, se détachent et viennent crever à la surface du liquide. L'eau renferme toujours, comme on sait, de l'air dissous dans sa masse aux températures ordinaires; cet air s'en dégage à mesure que la température monte, et donne naissance au phénomène que nous venons d'indiquer. Au-

delà de 80° c., les choses changent d'aspect. Le liquide, soulevé çà et là sur la *surface de chauffe*, retombe presque au même instant sur la paroi du vase. Ce phénomène s'accélère, de nouvelles bulles se forment, s'élèvent dans la masse liquide, s'amoindrissent à mesure qu'elles progressent, et meurent avant d'avoir atteint la surface: ce sont de véritables bulles de vapeur. En même temps on entend un bruit particulier qui précède toujours le phénomène de l'ébullition. Enfin, celui-ci se développe complètement. La température de l'eau s'était élevée d'une manière continue jusqu'à ce moment: *elle devient dès lors stationnaire*. L'activité du foyer de chaleur, l'étendue de la surface de chauffe, peuvent accroître la rapidité de l'ébullition; elles ne modifient pas la température à laquelle elle a lieu.

L'ébullition consiste dans cette formation, au sein de la masse liquide, sur les parois échauffées du vase, de bulles de vapeur qui, après avoir traversé la masse liquide, viennent crever à sa surface. Pour que ce résultat soit produit, il faut évidemment que la force élastique de la vapeur qui constitue ces bulles, soit capable de résister aux pressions qui s'exercent sur elles, c'est-à-dire à la pression atmosphérique augmentée même des pressions exercées par le liquide lui-même, et que l'on peut, à la vérité, négliger vers sa surface.

183. L'ébullition de l'eau est donc intimement liée à la pression exercée sur sa surface. La température à laquelle elle a lieu, égale à 100° sous la pression 760^{mm} , n'est plus que de 95° sous la pression 634 . Nous avons donc eu raison de dire que, lorsqu'on prend le point 100° d'un thermomètre, il faut avoir soin en même temps de noter la hauteur barométrique, et de marquer au point où affleure le mercure, non 100° , mais la température correspondante à la pression observée.

Constance
de la température
d'un liquide
en ébullition.

Rapport
entre la pression
et la température
d'ébullition.

Sur les hautes montagnes, l'eau bout à une température beaucoup plus basse qu'au niveau des mers ; elle varie sans cesse en un même lieu comme le baromètre ; à tel point que l'observation de la température d'ébullition de l'eau à un moment et en un lieu donnés , pourrait remplacer l'emploi du baromètre dans l'évaluation des pressions.

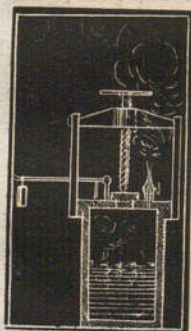
Fig. 106.



On peut donc à son gré accélérer ou retarder l'ébullition de l'eau. Versons de l'eau dans un ballon , faisons-la bouillir quelque temps , fermons le ballon et renversons-le : l'espace resté libre au-dessus de l'eau sera rempli de vapeur qui empêchera l'ébullition ultérieure du liquide ; mais si nous refroidissons et condensons cette vapeur par un courant d'eau froide, l'ébullition reprendra son cours.

Plaçons, dans le récipient d'une machine pneumatique, de l'eau seulement tiède, au-dessus d'un bain d'acide sulfurique concentré qui absorbe les vapeurs à mesure qu'elles se forment, et faisons le vide. L'ébullition de l'eau commencera lorsque l'élasticité de l'air restant sera égale à la tension maxima de la vapeur d'eau à la température de l'eau sou-

Fig. 107.



mise à l'expérience. Tout liquide qui donne des vapeurs à une température peut bouillir ainsi à cette température si on parvient à faire convenablement le vide au-dessus de lui.

Dans les circonstances ordinaires, la vapeur ne peut se former au sein même du liquide ; c'est à sa surface seulement qu'elle prend naissance.

Renfermons, au contraire, un liquide dans un vase clos ; à quelque tempéra-

ture que nous le portions, il n'y saurait bouillir ; mais, si nous ouvrons une issue à la vapeur, l'ébullition se produira à une température d'autant plus haute, que l'ouverture, plus petite, laissera échapper, dans un temps donné, une proportion moindre de la vapeur qui serait fournie dans le même temps par le liquide, et que cette vapeur acquerra une élasticité plus grande dans le vase. C'est sur ce principe qu'est fondé l'emploi de l'autoclave et de la marmite de Papin.

Marmite
de Papin.

Autoclave.

D'autres influences que celle de la pression peuvent cependant modifier la température d'ébullition de l'eau. Les substances qu'elle a dissoutes, la fixant pour ainsi dire, diminuent sa tendance à se transformer en vapeur, et relèvent son point d'ébullition. Certains vases produisent le même effet à cause de l'adhérence qui se développe entre le vase et le liquide, et qui doit être vaincue avant que la vapeur se forme sur la paroi échauffée. Il se présente toutefois ici un phénomène remarquable : à quelque température que bouille de l'eau impure, sous la pression 760, la vapeur qui s'en est échappée paraît avoir toujours 100°. C'est pour cette cause que nous avons recommandé de plonger nos thermomètres seulement dans cette vapeur quand nous voulons déterminer leur second point fixe 100°.

184. L'invariabilité relative de la température d'un liquide en ébullition ne peut s'expliquer qu'en admettant que l'eau, en se transformant en vapeurs, absorbe de la chaleur latente, comme la glace en se fondant. C'est ce qui a lieu en effet. Telle est la cause du sentiment de fraîcheur et même de froid que l'on éprouve lorsqu'on a versé dans la main de l'eau, de l'alcool, de l'éther,.... qui s'y vaporisent plus ou moins rapidement; de l'abaissement de température observée dans les alcarazas, vases poreux qui laissent

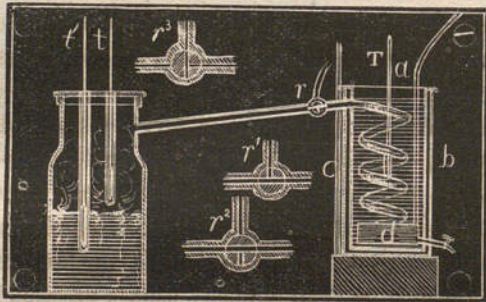
Chaleur latente
de volatilisation.

suinter, au travers de leurs parois, de l'eau qui recouvre leur surface extérieure et s'y vaporise. C'est cette cause, enfin, qui nous permet de conserver constante la température de notre corps, même au milieu des chaleurs les plus vives de l'été, lorsque la transpiration cutanée peut s'effectuer chez nous sans entraves. Le froid produit par l'évaporation peut être assez grand pour congeler l'eau dans le vide.

185. La vapeur, en se condensant, restitue à l'état de liberté la chaleur qu'elle avait absorbée et dissimulée au

Fig. 108.

Mesure
de la chaleur
latente
de volatilisation
de l'eau.



thermomètre en se formant, et nous trouvons dans ce fait un moyen sûr et facile de mesurer cette chaleur latente. A cet effet, dans l'appareil *fig. 105*, au lieu de condenser la vapeur dans le tube *a*, on la fait passer dans un serpentin renfermé dans un double vase en cuivre mince et poli *b*. Le tube *a*, *fig. 108*, mis également en relation avec un vase *A* entouré d'eau, sert encore à régler la pression supportée par le liquide en ébullition, et par suite la température à laquelle a lieu cette ébullition. Un thermomètre *T* indique la température de l'eau du serpentin abrité contre le rayonnement de la chaudière par un triple écran en laiton poli *c*; enfin, un robinet à double effet sert à faire passer la vapeur de la chaudière dans le serpentin *b*, ou dans un autre appareil réfrigérant semblable, également

mis en relation avec le réservoir A. Lorsque l'on veut faire l'expérience, on place le robinet r dans la position r^3 , on raréfie ou on condense l'air dans le vase A, on porte l'eau de la chaudière à l'ébullition : la vapeur qui s'en échappe passe dans le serpentín additionnel. Lorsque le phénomène est devenu bien régulier, que l'eau du serpentín b a été abaissée de 2° , par exemple, au-dessous de la température ambiante, on retourne le robinet r dans la position r^2 . La vapeur circule alors dans le serpentín b , s'y condense; l'eau qui en résulte s'accumule dans le vase d , la température de l'eau en b s'élève, et quand elle dépasse de 2° la température de l'air ambiant, on arrête l'expérience. L'eau du serpentín prenait de la chaleur au contact de l'air extérieur, tant qu'elle était plus froide que cet air; elle en a perdu une égale quantité pendant la seconde période de l'expérience où elle était, au contraire, plus chaude que cet air; l'excès de chaleur qu'elle possède provient donc tout entier de la vapeur qui s'y est condensée. La masse de l'eau du serpentín, la masse et la capacité calorifique du serpentín lui-même et du vase qui le renfermait, jointes à l'élévation de température de cet appareil, permettaient de calculer la quantité de chaleur cédée par la vapeur; le poids de cette vapeur étant connu d'ailleurs par le poids de l'eau résultant de sa condensation, on pouvait en déduire aisément la chaleur absorbée par l'unité de masse d'eau en se vaporisant à la température de l'expérience. M. Regnault a trouvé ainsi que la chaleur qu'il faut ajouter à 1^k d'eau à zéro pour le transformer en vapeur sous les pressions de 1, 3, 5, 10, 15... atmosphères, ou aux températures 100° , $135^\circ,1$, 153° , $181^\circ,6$, $200^\circ,5$, est capable d'élever de 1° , 636^k , 647^k , 652^k , 663^k , 678^k d'eau. Aussi emploie-t-on souvent la vapeur d'eau comme moyen de chauffage dans l'industrie.

Chauffage
à la vapeur.

CHAPITRE X.

MACHINES A VAPEUR.

186. L'emploi de la vapeur, comme force motrice, a acquis de nos jours une telle importance dans l'industrie, que nous ne pouvons nous dispenser de consacrer un chapitre à cet intéressant sujet. L'exiguité de notre cadre nous obligeant toutefois à être très-bref, au lieu d'embrasser l'histoire des machines à vapeur et la description des modifications nombreuses qu'elles ont subies, nous nous attacherons spécialement à une seule machine, la locomotive, que l'on peut regarder avec raison comme le type le plus parfait qui ait été réalisé jusqu'à ce jour.

187. Toute machine à vapeur se compose essentiellement, comme les pompes, d'un ou de plusieurs corps de pompe dans lesquels se meut un piston. Mais tandis que, dans les pompes, le piston, mu par une force extérieure, entraîne avec lui le fluide qu'il doit mouvoir; dans la machine à vapeur, c'est ce fluide, *la vapeur*, qui chasse le piston avec une force que celui-ci doit transmettre au dehors. Le corps de pompe où la vapeur exerce son action, la chaudière dans laquelle se forme la vapeur, le passage de celle-ci de la chaudière dans le corps de pompe, et sa disparition quand sa présence devient inutile ou nuisible, tels sont les points principaux qui devront fixer notre attention.

Chaudière.

Boîte à fumée.
Boîte à feu.

188. Le corps de la chaudière est formé par un cylindre de tôle de fer de 2^m,5 de long, sur 1^m,2 de diamètre, qui s'engage par le bout de l'avant *ee*, dans la boîte à fumée *ff*, et, par le bout de l'arrière *gg*, dans la boîte à feu *gg*, *fig. 113*. 150 tubes en laiton, d'une longueur convenable et de 4^{cm} de diamètre extérieur, établissent au travers de la chaudière une communication entre ces deux boîtes. La

boîte à feu *qq*, logée dans la partie postérieure de la chaudière, est percée d'une porte *i* destinée à introduire le combustible, et sur les parois antérieures de 150 trous dans lesquels sont solidement fixées les extrémités des tubes de laiton. La boîte à fumée, seulement placée au bout de la chaudière, est séparée de celle-ci par un fond plat percé également de 150 ouvertures. Diverses pièces de fer contribuent à la solidité de la machine qui supporte habituellement une pression de 5 atmosphères, et sans doute pourrait résister à des pressions beaucoup plus fortes.

L'eau de la chaudière se loge, non-seulement dans la partie cylindrique, de manière à envelopper tous les tubes de laiton, mais s'élevant jusqu'au niveau tracé dans la figure, elle recouvre la paroi supérieure de la boîte à feu, et, pénétrant jusqu'en *h*, elle embrasse celle-ci presque de toutes parts. Si on ajoute à cela que les produits de la combustion circulent dans la masse de l'eau, au travers des tubes de laiton, avant de s'échapper au dehors par la boîte à fumée, on comprendra combien la surface de chauffe est étendue et l'action du foyer énergétique. Pour accroître encore l'intensité du feu et suppléer à la brièveté de la cheminée, un jet de vapeur sortant du tube *p* y produit un tirage des plus actifs, que l'on peut modérer à volonté à l'aide de la clef *j*. Le volume de l'eau est de 20 hectolitres, et le volume de la chambre à vapeur, située au-dessus de l'eau, d'environ 10 hectolitres. L'étendue de la surface de chauffe est de 45^m environ, pouvant fournir par heure de 2,000 à 3,000^k de vapeur, ce qui, dans les locomotives, correspond à une force de 60 à 70 chevaux (1).

La vapeur est prise dans le dôme *k*, pénètre par le

Chambre
à vapeur.

Surface
de chauffe.

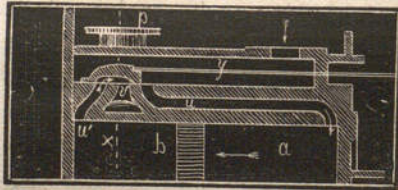
(1) On appelle cheval-vapeur une force capable d'élever, d'un mouvement continu, un poids de 75 k. avec une vitesse de 1^m par seconde.

Distribution
de la vapeur.

tuyau k dans une espèce de réservoir k'' d'où elle passe dans le tube m par le régulateur l formé d'une cloison dans laquelle sont taillés deux secteurs que l'on peut fermer à l'aide de deux secteurs semblables et plus grands, mobiles autour de l'axe l . Du tuyau m , la vapeur passe dans deux tubes $m' m''$, d'où elle se rend dans les deux corps de pompe $a b$. Lorsqu'elle y a exercé son action, elle s'en échappe par l'ouverture v , figures 109 et 111, et par le tube p .

189. Voyons maintenant comment agit la vapeur dans les deux corps de pompe d'une locomotive. La vapeur passe de m dans une boîte allongée y , fig. 109, dans laquelle viennent déboucher trois ouvertures. Les deux extrêmes u et u' communiquent l'une avec l'extrémité antérieure, l'autre avec

Fig. 109.



Tiroir.

l'extrémité postérieure du corps de pompe, de chaque côté du piston; l'ouverture intermédiaire v débouche dans le tuyau d'échappement p . Une

pièce appelée tiroir sert à mettre en communication avec l'ouverture moyenne v et le tuyau p , soit l'ouverture antérieure u , soit l'ouverture postérieure u' . Nous donnons

Fig. 110.

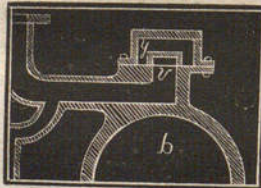
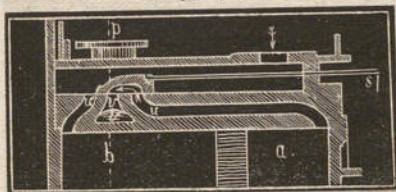


fig. 110 une coupe d'un cylindre suivant la ligne x , de manière à montrer comment v communique avec le tuyau d'échappement p .

Supposons le tiroir dans la position indiquée fig. 109; u' et p communiquant ensemble, la partie postérieure b du corps de pompe est mise en relation avec l'air extérieur qui presse le piston avec une force égale à

une atmosphère. Si on ouvre à ce moment le régulateur *l*, la vapeur arrive en *a* et presse le piston avec une force égale à 4 ou 5 atmosphères, force de la vapeur; le piston marchera donc avec une force égale à 3 ou 4 atmosphères. Si, au moment où il arrive à l'extrémité de sa course, le

Fig. 111.



tiroir change de position pour prendre celle qui est indiquée fig. 111, la vapeur qui était en *a* s'échappera dans l'air par le tuyau *p*, tandis que l'espace *b* se remplira de ce fluide. Le piston rebrousse le chemin avec une force égale à la force qui lui avait imprimé son premier mouvement.

Le mouvement de va et vient du piston se transmet, au moyen de la tige *c* et de la bielle *d*, à l'axe coudé des grandes roues de la locomotive, où il se transforme en un mouvement de rotation. Ces roues ne tournent pas sur elles-mêmes; l'adhérence qui se développe entre elles et les rails, force la circonférence à se développer comme si les rails étaient des crémaillères, et les roues elles-mêmes des roues dentées. La circonférence de ces grandes roues est de $4^m,4$: en supposant donc un double coup de piston par seconde, la roue tournera 3,600 fois par heure, et fera, dans le même temps, $15^{\text{km}}84$ ou 16^{km} ; deux doubles coups par seconde feraient marcher de 8 lieues par heure environ. Comme il y a, à chaque locomotive, deux corps de pompe agissant ensemble sur l'axe de la roue, bien qu'à mouvements croisés, c'est deux quadruples sifflements de vapeur que l'on entendra par seconde.

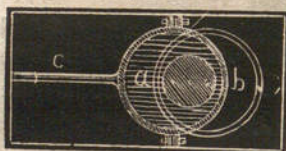
190. Toutes les fois qu'une bielle animée d'un mouvement de va et vient fait tourner une manivelle ou un axe coudé,

Bielle.

Points morts.

son action se trouve annulée complètement par la résistance de l'axe de rotation, dans les deux positions où la bielle et le bras de levier sont dans le prolongement l'un de l'autre. Ces deux positions sont appelées *points morts*. L'existence des deux cylindres fait disparaître ou amoindrit cet inconvénient. Les points morts étant à angle droit dans les deux machines, elles se secourent mutuellement, et l'effort est plus continu ; il est également symétriquement placé près des deux roues motrices. L'axe des

Fig. 112.



Excentrique.

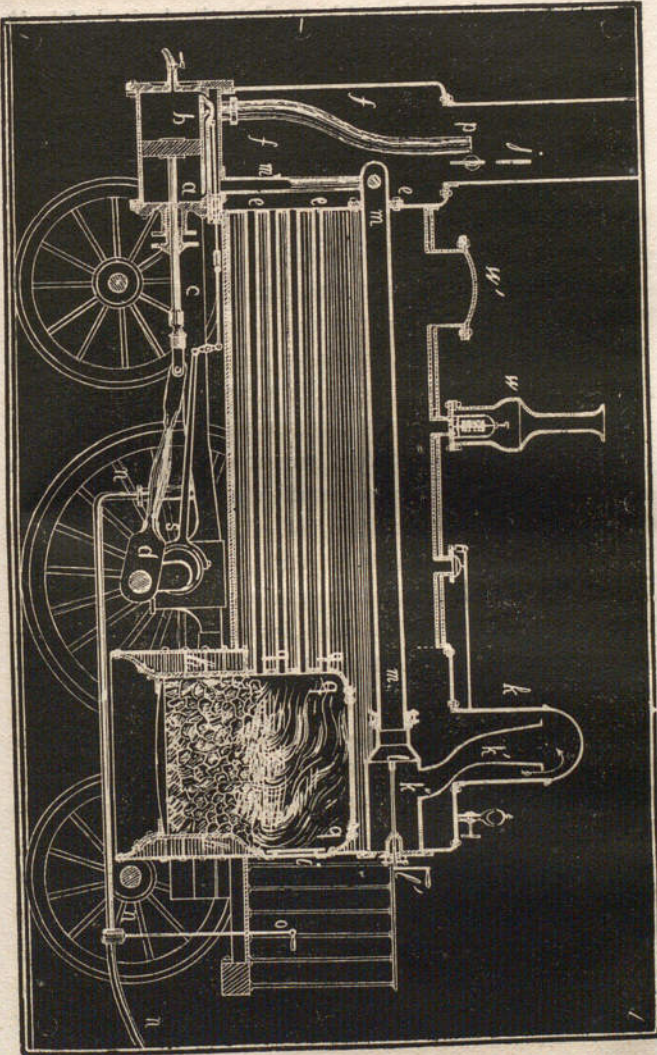
roues, tournant ainsi sur lui-même, imprime à son tour un mouvement de va et vient à la tige du tiroir *s*, au moyen d'un excentrique *a b*, fig. 112. La machine opère donc elle-même

la distribution de la vapeur dans ses cylindres. C'est elle encore qui restitue à la chaudière l'eau qu'elle perd en vapeur, au moyen de deux pompes foulantes mises en mouvement par les tiges des pistons des deux cylindres. Ces pompes puisent l'eau dans le tender au moyen du tuyau *n* ; le robinet *o* permet au mécanicien de régler l'alimentation suivant les indications fournies par un tube de verre extérieur à la chaudière, et dans lequel on peut voir le niveau de l'eau dans cette chaudière. Dans notre fig. 113, *w* représente la soupape de sûreté, *w'* le trou par lequel l'on pénètre dans la chaudière pour la nettoyer.

191. Nous terminerons ce chapitre par quelques indications sur la résistance des convois.

Résistance des convois.

L'expérience a montré que, sur une voie de niveau, l'effort nécessaire, pour mettre en mouvement des wagons en bon état, est égal à $\frac{1}{350}$ de leur poids ou de 4^k par tonne de $1,000^k$. Une corde horizontale, attachée à un convoi, enroulée sur une poulie, et tirée verticalement



par un poids à son extrémité libre, entraînerait donc autant de tonnes que le poids qui la tend contiendrait de fois 4^k . Un cheval-vapeur, soulevant un poids de 75^k avec une vitesse de 1^m par $1''$, ou de $3,600^m$ par heure, ne pourrait soulever qu'un poids de 7^k5 avec une vitesse de 36^km par heure, livre I, § 48. Chaque cheval-vapeur peut donc mouvoir, avec cette vitesse, un poids de $1,000^k$ multiplié par 7^k5 , et divisé par 4 , ou de $1,875^k$, et une locomotive de 60 chevaux un poids de 112,5 tonnes.

Sur un excellent pavé, la résistance est 4 fois plus grande, ou d'environ 16^k par tonne; sur une route bien ferrée, de 30 à 32^k , et sur une route en mauvais état, de 60^k au moins. Un cheval chargé de $1,500^k$, n'aurait donc à exercer, pour mettre sa voiture en mouvement, avec une vitesse de $3,600^m$ par heure, sur une route horizontale et bien ferrée, qu'une traction de 48^k sans les frottements des essieux dans les roues; mais cet effort croît très-rapidement avec l'inclinaison de la route.

Nous terminerons ici notre examen rapide des modifications physiques apportées dans les corps par la chaleur. Il nous reste à étudier cet agent en lui-même, à énumérer les propriétés dont il jouit, les lois suivant lesquelles il se propage dans l'espace et dans les corps. Les affinités de jour en jour plus nombreuses et mieux définies que présentent la chaleur rayonnante et la lumière, nous font un devoir de rapprocher ces deux agents dans l'étude que nous devons en faire : nous y gagnerons en clarté et en étendue.

LIVRE QUATRIÈME.

MAGNÉTISME.

CHAPITRE I^{er}.

AIMANTS ET SUBSTANCES MAGNÉTIQUES.

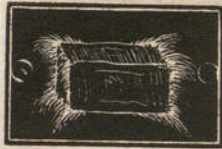
192. Les considérations qui nous ont fait joindre à la lumière l'étude de la transmission du calorique, auraient pu nous engager à traiter concurremment du magnétisme et de l'électricité. Chaque jour les liens qui unissent ces deux agents se resserrent et se multiplient, et l'époque n'est pas loin de leur fusion franche et complète en un seul et même agent. Mais la connaissance des principaux phénomènes magnétiques étant nécessaire à l'intelligence de ces rapports et à l'étude même des phénomènes électriques, nous exposerons les premiers isolément sans rien préjuger sur leur cause.

193. Il existe, dans la nature, certains minerais de fer qui jouissent de la propriété remarquable d'attirer le fer. La connaissance de ce fait remonte à une haute antiquité, car Platon en parle dans ses dialogues; il resta toutefois stérile pendant bien long-temps, et ce n'est que depuis un petit nombre de siècles que l'aimant a cessé d'être, en Europe, un simple objet de curiosité, pour devenir un guide précieux sur les mers. Les aimants naturels peuvent être retirés aujourd'hui d'un grand nombre de localités.

194. Prenons un de ces corps, plongeons-le dans de la

Aimants
naturels.

Fig. 114.

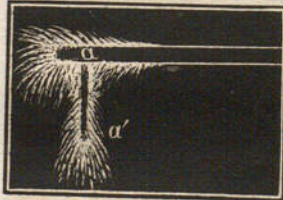


Substances
magnétiques.

Pôles
des aimants.

Aimantation
par influence.

Fig. 115.



limaille de fer, nous le verrons en entraîner avec lui une quantité notable distribuée à sa surface d'une manière plus ou moins régulière. De petites tiges de fer, approchées au contact de certaines parties de ces aimants, y resteront également suspendues, et, ce qui n'est pas moins remarquable, y acquerront la propriété d'attirer elles-mêmes et de retenir des parcelles ou de petites tiges de fer.

Le nickel aux températures ordinaires, et le manganèse à 20° au-dessous de 0° , participent à un faible degré des propriétés du fer en présence des aimants. Les autres corps sont à peu près absolument insensibles à leur action; mais aussi ils ne s'opposent nullement à la transmission de cette action. L'aimant attire le fer au travers du verre, du bois, du cuivre, du zinc, ... comme au travers de l'air ou du vide.

195. La limaille de fer qui s'attache à l'aimant n'est pas distribuée uniformément à sa surface; elle occupe plus particulièrement certaines faces, lignes ou points. En l'examinant avec soin, on voit, de plus, que les parcelles de fer sont juxta-posées bout à bout en espèces de filaments nom-

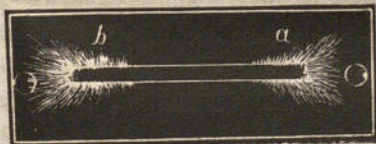
breux. Chaque parcelle de fer est devenue un aimant qui en retient une autre. Approchons, en effet, de notre aimant un petit barreau de fer, et saupoudrons celui-ci de limaille; le métal s'y attachera comme il le faisait à

l'aimant lui-même. Ainsi donc, non-seulement l'aimant attire le fer, mais encore il peut lui transmettre, au contact ou à distance, des propriétés analogues à celles dont il jouit, sans en rien perdre lui-même.

Le fer doux s'aimante ainsi par influence avec une grande

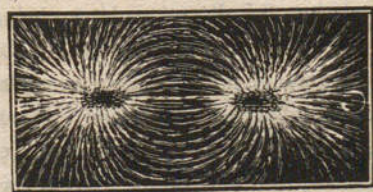
facilité ; mais dès qu'il est soustrait à l'action de l'aimant , il perd avec une égale facilité ses propriétés nouvelles et transitoires. Le fer écroui, l'acier, et surtout l'acier trempé, sont plus rebelles à l'influence magnétique ; mais aussi ils en conservent une modification durable. La *force coercitive*, espèce de résistance passive au développement des forces magnétiques dans ces corps, s'oppose à leur disparition quand s'est éloignée la cause qui les a développées. Cette propriété de l'acier est d'une immense utilité dans l'étude des phénomènes magnétiques. Grâce à elle , nous pouvons former des aimants artificiels durables jouissant de toutes les propriétés des aimants naturels, dans lesquels les forces magnétiques sont distribuées avec plus de régularité, et dont les formes peuvent s'adapter facilement à toutes les nécessités des expériences.

Fig. 116.



plongions dans la limaille , le fer s'y attachera comme à un

Fig. 117.



aimant naturel. Le phénomène devient surtout remarquable si nous plaçons au-dessus de l'aimant couché sur une table, une feuille de papier tendue sur un châssis en bois. En projetant de la limaille de fer sur la surface de cet écran , à l'aide d'un petit tamis , on voit s'y former une multitude de filaments d'une grande longueur, et qui semblent tous partir en divergeant de deux points situés vers les deux extrémités du barreau. C'est en ces mêmes points que les forces magnétiques *paraissent* le plus déve-

196. Si nous prenons un des aimants artificiels que l'on rencontre abondamment dans le commerce, et que nous le

Aimants artificiels.

loppées, et cette concentration des forces actives leur a fait donner le nom de *pôles*. Ce sont des points analogues au centre de gravité des corps pesants.

Pôles
des aimants
artificiels.

Action réciproque
des aimants.

197. L'action que les aimants exercent les uns sur les autres n'est pas moins remarquable que celle qu'ils exercent sur le fer. Tandis que le fer doux est attiré également par les deux pôles, si nous présentons l'un des pôles d'un aimant successivement aux deux pôles d'un autre aimant, nous verrons dans un cas une attraction, dans l'autre une répulsion apparaître entre eux, et il en est ainsi dans quelque condition que l'on opère. Les deux pôles d'un même aimant jouissent donc de propriétés contraires; l'un attire ce que repousse l'autre.

Direction
des aimants
par la terre.

Cet antagonisme des pôles se manifeste encore dans l'action de la terre sur les aimants. Suspendons par son milieu

Fig. 118.

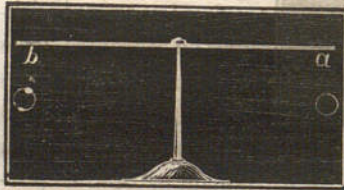
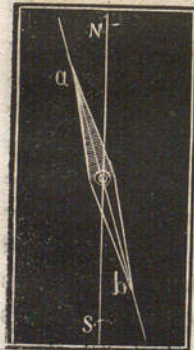


Fig. 119.



une aiguille aimantée à un fil ou mieux sur une pointe métallique; en quelque position qu'elle se trouve, elle tournera sur son point d'appui, s'il est nécessaire, et prendra dans l'espace une direction déterminée, voisine de la direction du méridien, le même pôle constamment dirigé vers le nord. Suspendons ainsi deux aiguilles, et présentons un même pôle à leurs deux pôles nord, par exemple, tous deux seront attirés ou tous deux repoussés: ils se comporteront de la même manière. Prenons maintenant une de nos deux aiguilles, et présentons son pôle nord au pôle nord de l'aiguille restée suspendue: une répulsion se manifestera. Nous con-

clurons de ce fait que deux pôles de même nom se repoussent; et comme les deux pôles d'un même aimant jouissent de propriétés opposées, nous ajouterons que deux pôles de noms contraires s'attirent.

La direction des aimants par la terre a été long-temps expliquée par l'existence, au sein du globe, des deux forces magnétiques distribuées, l'une dans l'hémisphère nord, on l'appelle force boréale, l'autre dans l'hémisphère sud, la force australe. La force boréale terrestre attire le pôle austral de l'aimant qui se dirige vers le nord, tandis que le pôle boréal se dirige vers le sud.

198. Si l'on rapproche deux aimants égaux par leurs pôles opposés jusqu'à les faire toucher bout à bout, on voit les propriétés magnétiques de ces deux pôles décroître peu à peu et s'évanouir au contact. Les forces antagonistes se neutralisent, se dissimulent mutuellement; car, si on sépare de nouveau les deux aimants, on voit ces forces reparaitre avec leur intensité primitive. Réciproquement, si, après avoir promené une aiguille aimantée le long d'un aimant vertical, et après avoir reconnu que les deux forces magnétiques vont en décroissant régulièrement des pôles vers le milieu de l'aimant où elles disparaissent en une région appelée *ligne neutre*, on vient à briser cet aimant en deux parties, on voit apparaitre aux points où la rupture s'est faite deux nouveaux pôles contraires, en sorte que chaque fragment forme un nouvel aimant complet avec ses deux pôles et sa ligne neutre. Ce phénomène se reproduisant toujours quelque court que soit l'aimant, on en conclut que les forces magnétiques sont groupées autour des molécules même de l'acier, que les forces opposées de deux molécules voisines se neutralisent mutuellement d'une manière d'autant plus complète que l'on s'éloigne davantage des pôles pour se rapprocher de la ligne neutre.

Pôles magnétiques terrestres.

Pôle boréal.
Pôle austral.

Ligne neutre.

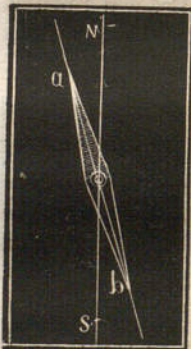
Pôles nouveaux d'un aimant brisé.

CHAPITRE II.

ACTION DE LA TERRE SUR LES AIMANTS.

199. La constance avec laquelle une aiguille aimantée, librement suspendue dans l'espace, se dirige, en un même lieu, vers une région déterminée du ciel, a fait de cet instrument l'un de nos guides les plus précieux dans nos courses aventureuses ; aussi a-t-on étudié ce phénomène avec la plus vive sollicitude sur les divers points du globe.

Fig. 120.



Déclinaison
de l'aiguille
aimantée.

Variations
de la
déclinaison.

Variations
séculaires.

200. A Paris, le pôle austral de l'aiguille aimantée n'est point tourné directement vers le nord ; il est dévié légèrement vers l'ouest. La ligne qui joint les deux pôles d'une semblable aiguille forme, avec le méridien de ce lieu, un angle appelé *déclinaison*, dont la valeur actuelle est de 22° et quelques minutes.

La déclinaison n'a pas toujours été telle à Paris ; en 1580, elle était $11^{\circ},30'$ à l'orient ; en 1663, elle était nulle : l'axe magnétique de l'aiguille coïncidait avec le méridien terrestre. Depuis lors, la déclinaison a été constamment occidentale. Toujours croissante jusqu'en 1829, où elle a atteint une valeur maximum de $22^{\circ},29'$, elle paraît diminuer lentement aujourd'hui. L'aiguille aimantée semble exécuter ainsi en chaque lieu des oscillations d'une amplitude variable et encore indéterminée, et dont la durée, également indéterminée, embrasse plusieurs siècles. La cause et les lois de ce phénomène nous sont complètement inconnues jusqu'à ce jour.

Outre ces variations séculaires, l'aiguille aimantée éprouve encore des variations diurnes, mais assez faibles pour qu'on n'en puisse constater l'existence et l'étendue qu'à l'aide d'instruments spéciaux et d'une grande précision. Il n'en est plus de même des perturbations qui sont occasionnées accidentellement par des orages, et surtout par l'apparition, même en des régions lointaines, des aurores boréales. L'aiguille éprouve, dans ces cas, de vives agitations d'autant plus surprenantes, que la cause en est souvent invisible pour nous. A Naples, et en général près des volcans, la déclinaison éprouve quelquefois des variations brusques de près de 1° à la suite des éruptions volcaniques; puis elle reste constante jusqu'à ce que des éruptions ultérieures viennent la modifier de nouveau.

201. La déclinaison, à une même époque, change notablement d'un lieu à un autre. Des cartes en représentent la grandeur et la direction aux divers points du globe.

On comprend aisément de quelle importance les cartes magnétiques sont pour les navigateurs qui ne sauraient se fier aux indications de leur boussole, s'ils ne connaissent pas exactement la déclinaison de l'aiguille dans les lieux où ils se trouvent. On peut, au reste, la déterminer directement sur mer, toutes les fois qu'il fait beau, au moyen de la *boussole marine* ou compas de variation, dont nous donnons une vue en dessus et une coupe verticale. Cet instrument se compose d'une aiguille aimantée *a b*, fixée sur un cercle léger en talc recouvert d'un cercle de papier sur lequel sont imprimés les divers *rumb*s de vent et les 360 divisions ordinaires du cercle: c'est la *rose des vents*. Cet appareil bien équilibré repose, à l'aide de la chape en agathe dont est munie l'aiguille, sur l'extrémité d'une pointe d'acier fixée au centre d'une caisse cylindrique en laiton fermée supérieurement par une lame

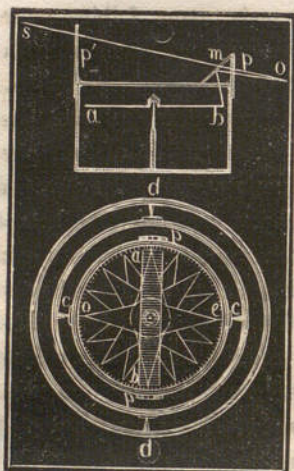
Variations
diurnes.

Variations
accidentelles.

Variations
de la déclinaison
à la surface
du globe.

Boussole
marine.

Fig. 121.



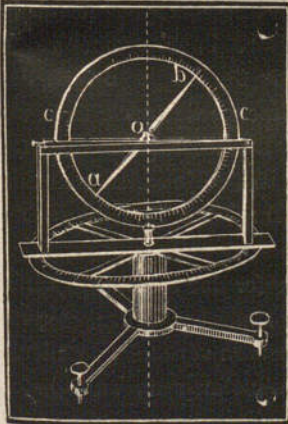
de verre, et destinée à préserver l'aiguille des agitations de l'air ou du contact des objets extérieurs. Cette caisse porte, mobile autour de son centre, un système de deux pinules ou fentes un peu larges pp' découpées dans des lames de cuivre. Au milieu de ces pinules deux fils sont tendus verticalement dans un plan qui contient aussi le pivot de l'aiguille et la ligne de foi tracée intérieurement sur la caisse. Devant la pinule p est placée, sous une inclinaison de 45° , une glace m dont la moitié inférieure est seule étamée, de telle sorte que l'œil placé en o puisse apercevoir par réflexion, sur la portion étamée, la ligne de foi et la division du cercle qui lui correspond, et, par transparence, la pinule opposée p' . Lorsqu'on veut se servir de cet instrument, on dirige les pinules vers le soleil ou un astre peu élevé au-dessus de l'horizon. L'heure et la situation du lieu de l'observation permettent de calculer, à l'aide de tables faites exprès, l'angle que fait alors la direction pp' avec le méridien; et en comparant cet angle avec l'angle formé par l'axe de l'aiguille aimantée avec la même direction pp' , on en déduit la déclinaison cherchée. Cet instrument, moins les pinules, sert à guider les marins dans leur marche. Les boussoles marines sont ordinairement suspendues sur deux axes croisés à angle droit qui leur permettent de se maintenir horizontales malgré les oscillations des bâtiments.

202. Si l'aimant attire le fer, réciproquement le fer doit

attirer l'aimant; il n'y a point d'action sans réaction dans la nature. Les énormes masses de fer qui entrent dans la construction ou le chargement d'un bâtiment, doivent donc exercer sur les boussoles des influences qui pourraient devenir funestes si le compensateur magnétique ne fournissait les moyens de s'y soustraire. Cet appareil se compose d'un disque de fer qui, lorsqu'il est placé dans une position convenable déterminée par le tâtonnement avant le départ, produit sur la boussole le même effet que les ferrures du bâtiment, et permet ainsi d'évaluer cette déviation accidentelle.

203. Les forces magnétiques terrestres dirigées dans le méridien magnétique n'agissent pas néanmoins dans un

Fig. 122.



plan horizontal. Le pôle austral d'une aiguille aimantée suspendue exactement par son centre de gravité, s'incline au-dessous de l'horizon dans notre hémisphère, tandis que le contraire a lieu dans l'hémisphère austral. L'inclinaison augmente de l'équateur, où elle est très-faible, jusqu'aux pôles où l'aiguille est à peu près verticale. Les lieux où elle est nulle forment, par leur réunion, l'équateur magné-

tique qui s'éloigne notablement de l'équateur terrestre.

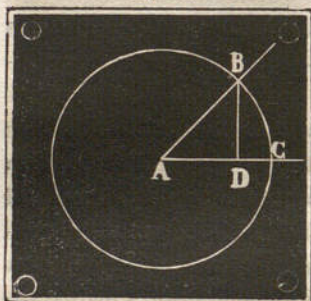
204. Les mêmes forces magnétiques capables de faire tourner un aimant sur lui-même pour le diriger dans le plan du méridien magnétique, sont, du reste, impuissantes à le transporter dans un sens quelconque, quelque légers que soient les frottements qui s'opposent

Réciprocité
des actions
magnétiques.Compensateur
magnétique.Inclinaison
de l'aiguille
aimantée.Boussole
d'inclinaison.Couple
terrestre.

à sa translation. Elles se réduisent à deux forces égales et contraires appliquées aux deux pôles de l'aimant, et s'y maintiennent en équilibre dès que la ligne de ces pôles coïncide avec leur direction. L'action *directrice* de ces forces est d'autant plus grande que l'aiguille aimantée est plus éloignée de sa position d'équilibre; elle est proportionnelle au *sinus* de l'angle que fait la ligne des pôles

Loi de la force
directrice
terrestre.

Fig. 123.



de l'aimant avec le méridien magnétique du lieu, ainsi que Coulomb l'a démontré expérimentalement à l'aide de sa balance.

Comme ce mot *sinus* reviendra plusieurs fois dans ce livre, nous croyons devoir le définir. Pour construire le sinus de l'angle BAC , dé-

crivons du sommet A une circonférence de cercle avec un rayon égal à l'unité, et du point B d'intersection de cette circonférence avec l'un des côtés de l'angle, abaissons sur l'autre côté la perpendiculaire BD : BD sera le sinus de l'angle BAC .

Aimantation
par la terre.

205. La terre communique au fer doux les propriétés magnétiques, ainsi que le ferait un aimant ordinaire. Plaçons une barre de fer doux dans une position verticale, ou mieux dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, immédiatement elle nous offrira les propriétés magnétiques; son extrémité supérieure attirera le pôle austral d'une aiguille aimantée, et *repoussera* son pôle boréal. L'extrémité inférieure agira inversement. Si nous retournons la barre bout pour bout, les mêmes effets auront lieu; les pôles auront changé d'extrémité. Il n'en serait plus ainsi si, pendant que la barre est aimantée, on venait à frapper quelques coups de

marteau sur l'un de ses bouts; l'aimantation deviendrait permanente. C'est sous l'influence des forces terrestres que les paratonnerres et les outils des serruriers ou autres ouvriers sur fer donnent des signes évidents d'aimantation.

CHAPITRE III.

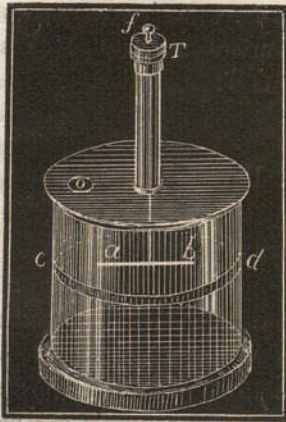
LOIS DES ACTIONS MAGNÉTIQUES.

206. Les actions que les forces magnétiques exercent l'une sur l'autre ont été étudiées avec soin par Coulomb. Le résultat général auquel est arrivé ce physicien célèbre est que *l'intensité de ces actions varie en raison inverse du carré des distances*. C'est suivant cette loi que se repoussent deux particules aimantées de la même manière, que s'attirent deux particules inversement aimantées. Les attractions ou répulsions qui se développent entre deux pôles d'aimant, formées par la résultante des actions élémentaires exercées par chaque particule aimantée de l'un des pôles sur chaque particule de l'autre, varieront donc suivant la même loi, si ces deux pôles sont assez éloignés pour que les forces élémentaires puissent être considérées comme parallèles, et qu'aucune influence étrangère ne vienne en contrarier l'effet. C'est ce qu'a vérifié Coulomb à l'aide de sa balance de torsion, fondée sur la réaction développée par la torsion des fils métalliques, réaction que nous avons vue, liv. I, chap. 2, être proportionnelle à l'angle de torsion du fil.

207. Un fil fin de cuivre, d'argent ou de platine, est pincé à sa partie supérieure au centre d'un bouton *f*, mobile au milieu d'un tambour *T* portant une division circulaire; à son extrémité inférieure est suspendue une

Loi des actions
magnétiques.

Fig. 124.

Balance
magnétique
de Coulomb.

Les forces
directrices

Vérification
de la
loi des forces
directrices
terrestres.

tige d'acier aimantée. Cet appareil, d'une grande sensibilité, est renfermé dans une cage en verre qui l'abrite des agitations de l'air, et sur le pourtour de laquelle sont tracées des divisions correspondant aux divisions du cercle.

208. Voulons-nous faire une expérience? nous enlevons l'aimant, et le remplaçons par une tige en cuivre de même poids. Cette substance, insensible aux actions magné-

tiques du globe, permet au fil de suspension de prendre sa position d'équilibre naturel. Nous tournons alors le bouton supérieur jusqu'à ce que la tige s'arrête au zéro de la division tracée sur la cage; puis nous remplaçons la tige aimantée mobile, et tournons la cage jusqu'à ce que cette tige, étant dirigée vers la même division, nous montre qu'elle est située dans le méridien magnétique sans torsion du fil de suspension.

L'appareil étant ainsi disposé, tordons le fil en tournant le tambour. La force de torsion développée déviera l'aiguille d'un angle qui peut se mesurer sur le cercle *cd*. En répétant plusieurs fois cette manœuvre, et comparant les diverses déviations de l'aimant avec les torsions qui les ont occasionnées, nous vérifierons la loi des sinus énoncée § 204, et pourrons en même temps mesurer, pour chaque angle de déviation de l'aiguille, la force directrice correspondante, laquelle est précisément égale à la torsion qui lui fait équilibre.

209. Voulons-nous, au contraire, vérifier la loi des répu-

sions magnétiques? nous détordons le fil et ramenons l'aimant mobile dans le plan du méridien. Son pôle austral, par exemple, regarde la division zéro du cercle *c d*; nous descendons alors verticalement une longue tige d'acier aimantée, de manière que son pôle austral occupe la position que vient de quitter le pôle austral de l'aiguille mobile. Une répulsion a eu lieu en effet : l'aiguille chassée s'arrête dans une position où la force de répulsion est équilibrée par la torsion du fil et par la force directrice du globe que nous venons d'évaluer en fonction de la force de torsion. La somme de ces deux forces peut donc servir de mesure à la répulsion des deux pôles à la distance où ils se trouvent. En tordant ou détordant le fil à l'aide d'un mouvement gradué du tambour, on peut varier à l'infini la position d'équilibre de l'aiguille mobile, et reconnaître ainsi l'exactitude de la loi qui nous occupe.

210. La loi des attractions entre deux pôles de noms contraires, semblable à la loi des répulsions, se vérifie en faisant osciller, dans un plan horizontal, une petite aiguille aimantée suspendue, dans le méridien du pôle austral ou boréal d'une longue aiguille d'acier aimantée, à des distances variables de ce pôle. La rapidité des oscillations de cette aiguille est réglée par l'attraction magnétique, comme la pesanteur le fait pour un pendule ordinaire; et de même que le pendule sert à mesurer l'intensité de la pesanteur et ses variations à la surface du globe, de même l'aiguille peut nous fournir une mesure proportionnelle de l'attraction qui la met en mouvement aux diverses distances de l'aimant où elle se trouve placée. L'analogie toutefois n'est pas complète. La pesanteur, en effet, agit seule sur le pendule; la force directrice de la terre vient ajouter son action à celle du pôle de l'aimant, et influer d'autant sur les oscillations de l'aiguille. Pour écarter cette cause d'erreur, il suffit de faire osciller

Vérifications
de la loi
des répulsions
magnétiques.

Vérification
de la loi
des attractions
magnétiques.

Mesure
de la composante
horizontale
des forces
terrestres.

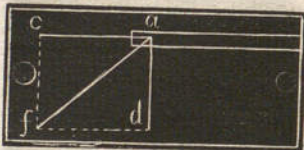
Mesure
des forces
magnétiques
terrestres.

Distribution
du magnétisme
sur les barreaux
aimantés.

l'aiguille sous la seule action des forces terrestres; on obtient ainsi une mesure proportionnelle de leur composante horizontale, que l'on retranche ensuite des résultats obtenus sous l'influence de l'aimant fixe.

211. L'aiguille aimantée nous fournit, disons-nous, la composante horizontale des forces magnétiques terrestres.

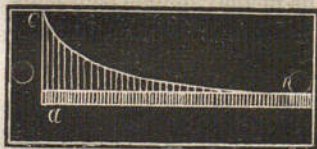
Fig. 125.



Dirigées, en effet, obliquement à l'horizon, elles peuvent se décomposer chacune en deux : une verticale d qui n'influe pas sur le mouvement de l'aiguille puisqu'elle est perpendiculaire au plan dans lequel elle se meut; l'autre horizontale c qui agit, au contraire, avec toute son intensité: c'est celle-ci seulement que nous avons mesurée. Mais, connaissant la composante c et l'angle d'inclinaison $c a f$, on en déduit facilement la force f à l'aide du parallélogramme $f a c d$. L'angle e est droit comme l'angle $c a d$.

212. Les forces magnétiques d'un aimant ne sont pas réellement concentrées à ses pôles, pas plus que la pesanteur au centre de gravité d'un corps; les résultantes seules y sont appliquées. En étudiant, à l'aide de notre aiguille mobile, la distribution de ces forces dans un aimant, on voit que, nulles vers le milieu n de cet aimant, elles vont

Fig. 126.



en croissant lentement d'abord, puis rapidement lorsqu'on s'approche des extrémités, comme on le voit dans la fig. 126, en sorte que c'est aux extrémités même que leur intensité est la plus grande.

CHAPITRE IV.

PROCÉDÉS D'AIMANTATION.

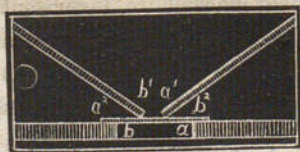
213. Les procédés employés pour communiquer les propriétés magnétiques aux barreaux, tiges ou aiguilles d'acier, sont assez variables. La terre, dans certains cas, suffit pour obtenir ce résultat § 205; c'est même à son action long-temps continuée qu'il faut rattacher l'aimantation des aimants naturels. L'électricité aussi, lorsqu'elle est en mouvement, est un puissant moyen d'aimantation, ainsi que nous le verrons plus tard. Nous ne nous occuperons ici ni de l'un, ni de l'autre.

C'est aux aimants que l'on a recours ordinairement pour en former d'autres.

214. Si nous n'avons qu'un seul aimant à notre disposition, et que nous désirions aimanter une aiguille de petites dimensions, il nous suffira de la faire glisser cinq ou six fois de suite uniformément et *dans le même sens* sur l'un des pôles de notre aimant. Ce procédé, dit de *la touche séparée*, est impuissant à former de forts aimants. Pour y parvenir, il faut avoir recours à la *double touche* qui, pour avoir toute son efficacité, exige l'emploi de quatre barreaux aimantés.

Deux forts barreaux sont placés sur une table, sur la même ligne, et les pôles de noms contraires en regard.

Fig. 127.



Sur leurs deux extrémités voisines *a* et *b* reposent les deux bouts du barreau *b' a'* que nous voulons aimanter. Posons alors sur le milieu de notre barreau les deux pôles op-

Méthode
de la simple
touche ou touche
séparée.

Méthode
de la double
touche.

posés de deux aimants $a^1 b^1$ inclinés d'un angle d'une trentaine de degrés, et, sans les y tenir arrêtés, écartons-les régulièrement en conservant leur inclinaison. Lorsque nous avons dépassé les deux extrémités du barreau $b^1 a^1$, élevons-les, rapprochons-les, posons-les de nouveau sur le milieu du barreau, et écartons-les encore symétriquement. Cette opération ayant été répétée dix, vingt ou trente fois, selon les cas, nous retournons le barreau sur une autre face, et renouvelons l'opération qui doit être ainsi pratiquée sur les quatre faces pour un barreau, et sur les deux faces pour une aiguille de boussole. Les aimants mobiles doivent agir dans le même sens que les aimants fixes, ainsi que l'indique notre figure. Chaque friction ajoute un nouveau degré d'énergie aux forces magnétiques développées, jusqu'au moment où elles atteignent leur *maximum*, dépendant des dimensions et du degré de trempe du barreau, en même temps que de la puissance des aimants employés. Les deux pôles a et b jouent un grand rôle dans la production du phénomène; en dissimulant pour ainsi dire les pôles b^2 et a^2 , ils facilitent l'action ultérieure des pôles $a^1 b^1$.

Point
de saturation.

Affaiblissement
des aimants.

Armures
des aimants.

215. Diverses circonstances amoindrissent graduellement les propriétés magnétiques des aimants, malgré la force coercitive qui existe en eux. Leurs deux pôles agissant l'un sur l'autre par attraction, les forces qui y sont accumulées tendent à les abandonner pour se distribuer plus uniformément dans toute l'étendue du barreau, et à s'y neutraliser mutuellement. Les variations de température, les chocs, toute cause d'ébranlement moléculaire, favorisent cette tendance; pour la combattre autant que possible, il faut laisser les aiguilles aimantées librement suspendues dans le méridien magnétique, et *armer* les barreaux. Si ces barreaux sont droits, ont les groupe parallèlement deux à

deux, les pôles opposés en regard et réunis par des pièces de fer doux appelées armatures. Les aimants en fer-à-cheval

Fig. 128.

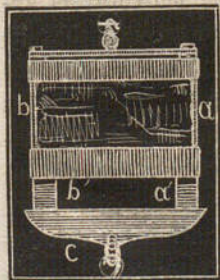


sont solitaires; leurs deux pôles, rapprochés l'un de l'autre, sont réunis par une armature ou *contact* en fer doux. Le fer doux s'aimante par influence; les deux pôles *a b* qui s'y forment attirent et retiennent les deux pôles inversement disposés *a et b*.

Il se présente ici un phénomène singulier et jusqu'à présent inexpliqué. Tout contact adhère à l'aimant avec une force variable avec cet aimant et que l'on peut mesurer par le nombre de poids nécessaire pour en opérer la séparation; mais si nous chargeons un contact graduellement et lentement, nous verrons la puissance de l'aimant s'accroître dans une proportion considérable. Si, par une surcharge, le contact finit par se détacher, cet excès de force disparaît pour revenir progressivement sous l'influence d'une traction croissante et prolongée.

On arme également les aimants naturels. On applique

Fig. 129.



sur les surfaces polaires de ces aimants, des lames minces de fer doux, terminées inférieurement par des masses plus épaisses appelées pieds de l'aimant. Chaque pied devient un pôle d'autant plus puissant que la force magnétique y est concentrée dans un plus petit espace. Ces pieds sont, à leur tour, armés d'un contact qu'il est également avantageux de charger.

Nous ferons connaître plus loin l'origine supposée des propriétés magnétiques développées dans les aimants.

Armature
des aimants
naturels.

LIVRE CINQUIÈME.

ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE I^{er}.

ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS ÉLECTRIQUES.

216. Les actions électriques sont loin d'être limitées à un aussi petit nombre de corps que les actions magnétiques; on peut les développer dans un corps quelconque placé dans des conditions favorables. Une foule de circonstances peuvent aussi les y faire naître, et il n'y a peut-être pas de phénomène physique, chimique ou physiologique, qui ne puisse être accompagné de phénomènes électriques.

Électrisation
par le
frottement.

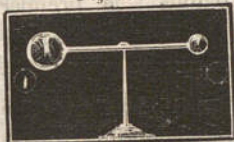
217. Prenons un bâton de verre, frottons-le avec une étoffe de laine ou de soie, ou avec une fourrure, et approchons-le de corps légers tels que des barbes de plume, de minces feuilles d'or battu; nous verrons ces corps, vivement attirés, se précipiter sur le bâton, et tantôt y rester adhérents, tantôt s'en éloigner immédiatement après le contact, pour être de nouveau attirés par lui lorsqu'ils auront touché le sol. Le bâton est dit *électrisé*. Cette expérience ne réussit pas avec les métaux et certains autres corps. Ce n'est point que la vertu électrique ne puisse y être développée, mais qu'elle ne s'y conserve point, comme nous le démontrerons dans ce chapitre.

Attractions
électriques.

Les corps électrisés n'attirent pas que les corps légers; tous sont soumis à leur action, et, s'ils n'y obéissent pas,

c'est que des résistances trop grandes s'opposent à leur déplacement. Suspendons, en effet,

Fig. 130.



à un fil sans torsion ou sur une pointe d'acier deux sphères métalliques, reliées entre elles par une tige horizontale, et approchons de l'une de ces sphères un corps électrisé par le frottement; l'attraction deviendra évidente à nos yeux. Si le corps électrisé était mobile, au contraire, et qu'on en approchât la main, par exemple, il se mouvrait à son tour. Les attractions électriques sont réciproques comme toutes les actions naturelles.

Réciprocité des actions électriques.

218. L'appareil le plus simple dont nous puissions nous servir pour étudier les propriétés électriques des corps, se compose d'une petite balle de sureau, suspendue par un

Fig. 131.



fil de lin à l'extrémité d'une tige de verre recouverte de cire d'Espagne ou de gomme laque. Si cet appareil est bien sec, et si nous approchons de la balle de sureau un bâton électrisé, l'attraction sera vive, et suivie, après un contact très-court, d'une répulsion tout aussi vive.

Pendule électrique.

Répulsions électriques.

Les actions électriques ne se manifestent donc pas seulement par des attractions.

La modification reçue par la balle de sureau persiste un certain temps. Si nous éloignons notre bâton, et que nous approchons notre doigt de la balle de sureau, celle-ci sera attirée; elle s'est donc électrisée pendant son contact avec le corps électrisé.

Électrisation par contact.

219. Répétons cette expérience avec un bâton électrisé de soufre, de résine..., les mêmes phénomènes se reproduiront. Opérons, au contraire, simultanément avec le verre et la résine; électrisons la balle de sureau par son contact

Dualité des forces électriques.

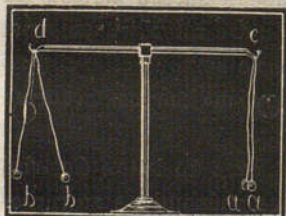
avec l'un deux, le verre, par exemple, et présentons-lui ensuite alternativement nos deux bâtons : le premier repoussera la balle, le second l'attirera, au contraire. Les propriétés électriques développées dans les corps par le frottement, ne sont donc pas identiques dans tous. De même que nous avons rencontré deux forces magnétiques, nous trouvons deux forces électriques opposées dans leur action; mais tandis que les deux premières coexistent toujours dans un même aimant, les dernières peuvent se trouver isolées dans les corps.

Antagoniste
des forces
électriques.

220. Deux corps électrisés de la même manière se repoussent; deux corps électrisés inversement s'attirent. Prenons, en effet, deux balles de sureau semblables et semblablement suspendues, touchons-les successivement ou simultanément avec un même bâton de verre ou de résine électrisé, et approchons-les l'une de l'autre; elles se repousseront. Touchons, au contraire, l'une avec un bâton de verre, l'autre avec un bâton de résine, elles s'attireront. On traduit cet antagonisme des forces électriques en disant que, par le frottement, le verre s'électrise *positivement* et la résine *négativement*; tous les corps peuvent s'électriser ainsi, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre.

221. Aux deux extrémités d'une tige de verre enduite de gomme laque et supportée

Fig. 132.

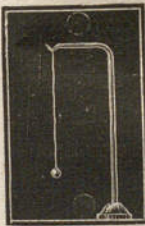


par un pied en verre, suspendons, par des fils de lin, des balles de sureau *a a*, *b b*, et approchons des dernières un corps électrisé quelconque. Après le contact, les sphères électrisées se repousseront comme l'indique la figure; les deux balles *a a* resteront rapprochées. Remplaçons maintenant notre tige de verre *d c* par une tige

métallique, et répétons l'expérience. Les sphères *a a* divergeront comme les sphères *b b*, bien qu'elles n'aient pas plus subi l'influence directe du bâton que dans l'expérience précédente. Les propriétés électriques se sont donc transmises des unes aux autres au travers du métal, tandis que le verre opposait un obstacle à cette transmission. Le métal est dit *bon conducteur*, le verre *mauvais conducteur* de l'électricité.

Tous les corps sont ainsi plus ou moins bons, plus ou moins mauvais conducteurs ; et les différences qu'ils présentent sous ce rapport nous donnent la clef d'un grand nombre de phénomènes électriques. Ainsi, suspendons une

Fig. 133.



tige métallique, et approchons-en un corps électrisé ; il y aura toujours attraction sans répulsion, comme si la sphère ne s'électrisait plus au contact. L'électricité qu'elle reçoit se perd dans le sol au travers des corps conducteurs qui soutiennent la balle de sureau. Une sphère isolée du sol par des corps mauvais conducteurs, a été électrisée ? nous

la touchons avec la main, elle perd ses propriétés électriques. Nous frottons un bâton de verre ? l'électricité positive reste confinée dans les points où elle a été développée. Si nous frottons, au contraire, une tige métallique, corps bon conducteur de l'électricité, cette électricité se perd dans le sol au travers de nos organes, et la tige ne conserve aucune modification apparente. Fixons notre tige à l'extrémité d'un tube de verre, et nous pourrions alors y développer, d'une manière permanente, de l'électricité dont le verre empêcherait la dispersion.

Si les deux forces électriques, positive et négative, peuvent exister isolément dans les corps, contrairement à

Corps bons,
corps mauvais
conducteurs.

ce qu'on observe dans les aimants, il est néanmoins généralement impossible de développer l'une sans l'autre.

Fig. 134.



Loi
de l'électrisation
par frottement.

Existence
hypothétique
de deux
électrités.

Prenons un disque de bois garni de drap et un disque de verre fixés à l'extrémité de deux tubes de verre, et, les tenant par ces tubes, frottons-les l'un contre l'autre et présentons-les successivement à une même balle de sureau isolée et électrisée : l'un l'attirera, l'autre la repoussera. Ces deux disques seront donc électrisés inversement. Toute électrisation par frottement se produit dans des conditions semblables. Si les corps frottant et frotté ne paraissent pas toujours électrisés tous les deux, c'est que l'un d'eux étant bon conducteur et mis en communication avec le sol par des corps bons conducteurs, laisse perdre son électricité. Les phénomènes se passent donc comme si les deux forces positive et négative préexistaient dans tout corps mutuellement neutralisées ou dissimulées. Aussi admet-on généralement l'existence de deux électrités, l'une positive, l'autre négative, douées de propriétés contraires et combinées dans les corps où elles forment le fluide neutre. Le frottement les séparerait. C'est tomber dans une hypothèse que les faits ne justifient pas complètement, contredisent même quelquefois, et qu'il faudra tôt ou tard abandonner ; mais, dans l'état actuel de la science, elle permet de grouper avec simplicité les faits qui sont du domaine de l'électricité. Nous ne pouvons pas espérer d'arriver de long-temps à l'intelligence claire et complète des phénomènes naturels, si jamais même nous atteignons ce résultat si désirable. Nos théories ne sont donc que des résumés généraux des faits acquis à la science, résumés essentiellement modifiables à mesure que s'accroissent nos richesses. Ce sont des formules qui

renferment, sous une forme claire, les liaisons des phénomènes, leurs rapports de coïncidence, de succession, et qui nous montrent les lacunes à combler. Nous admettrons donc avec ces réserves la théorie élémentaire des deux électricités. Si nous l'avons écartée pour le magnétisme, c'est qu'il nous est donné déjà d'entrevoir la formule qui relie cette force à l'électricité.

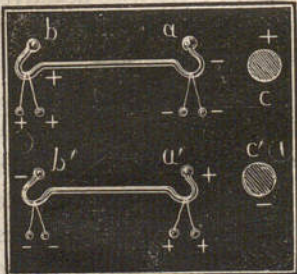
CHAPITRE II.

LOIS DES ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS ÉLECTRIQUES.

223. Un aimant aimante le fer ou l'acier sans rien perdre de ses propriétés; un corps électrisé cède une partie de son électricité aux corps au contact desquels il se trouve. Mais avant que le contact ait lieu, le phénomène électrique présente une grande analogie avec l'aimantation par

Électrisation
par influence.

Fig. 135.



influence. Prenons une tige de cuivre isolée par un pied en verre et munie à ses deux extrémités de deux couples de balles de sureau. Si nous approchons doucement de l'un de ses bouts *a* un corps *c* électrisé positivement, nous verrons nos petits pendules diverger et en *a* et en *b*. Dans cette situation, approchons des balles de sureau un autre corps électrisé négativement : les deux pendules seront repoussés en *a* et attirés en *b*; nous avons donc en *a* de l'électricité négative, et en *b* de l'électricité positive au contraire. Les propriétés électriques sont donc inverses aux deux extrémités de notre tige qui est ainsi électrisée par influence, et qui retombe à l'état naturel

dès qu'on éloigne le corps *c*, pourvu que l'expérience n'ait pas duré trop long-temps. Mais ce qui caractérise l'état que nous examinons, c'est que, si on séparait en deux, en son milieu, le conducteur *ab*, chaque partie conserverait son électricité, et nous aurions deux corps électrisés inversement, en l'absence même du corps *c*, sans que de nouveaux pôles apparussent. L'électrisation n'est pas particulière comme l'aimantation; l'agent électrique circule dans les conducteurs. Aussi, pendant que le corps *ab* est soumis à l'influence du corps *c*, touchons avec le doigt l'extrémité *b*; la force positive qui y est refoulée se dispersera dans le sol; les deux pendules *b* retomberont au contact. Enlevons alors le doigt, puis le corps *c*, le conducteur restera électrisé en tous ses points; tous les pendules divergeront, mais cette fois sous l'influence de la force négative seule. Le même résultat serait produit si on touchait *a* et non *b*: la force positive disparaîtrait encore.

L'expérience répétée avec un corps *c* électrisé négativement, nous présenterait des faits analogues.

224. Les électricités développées dans les corps ne sauraient s'y conserver par elles-mêmes; elles tendent à accroître indéfiniment l'espace qu'elles occupent. Elles se dispersent dans le sol quand elles sont mises en communication avec lui par des conducteurs; elles disparaissent dans le vide. Si, dans l'air, elles restent confinées dans les corps isolés où elles ont été développées ou transmises, c'est que l'air, mauvais conducteur, les tient emprisonnées comme l'est un gaz dans un vase clos de toutes parts. Toutefois, tandis que les gaz occupent uniformément tout l'espace qui leur est offert, l'électricité se porte *entièrement à la surface des corps conducteurs*.

L'électricité presse contre l'air qui s'oppose à son expansion avec une force d'autant plus grande qu'elle a acquis

Électrisation
permanente
par influence.

Concentration
de l'électricité
à la surface
des corps
conducteurs.

Tension
de l'électricité.

un plus grand degré d'énergie, qu'elle est plus condensée. C'est même à ces pressions qu'il faut attribuer les mouvements d'attraction ou de répulsion observés entre les corps conducteurs électrisés.

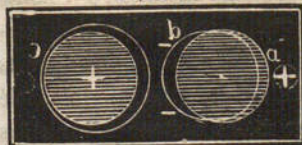
225. Dans les corps mauvais conducteurs, l'électricité se meut avec peine; une sorte d'adhérence y existe entre elle et les particules matérielles. Les attractions ou répulsions développées entre les électricités peuvent donc se transmettre directement aux corps. Mais, dans les corps bons conducteurs, il n'en est plus ainsi, puisqu'aucune résistance appréciable ne s'y oppose au déplacement de l'électricité.

Fig. 136.



Prenons deux corps électrisés de la même manière, positivement, par exemple, mettons-les en présence. Les deux électricités de même nom se repoussant, seront refoulées vers les points extrêmes *a a*, et y exerceront sur l'air ambiant une pression qui contre-balance en partie la pression atmosphérique. L'air pressant donc en *b* plus efficacement qu'en *a*, les deux corps s'éloigneront. Une distribution inverse amènerait un résultat opposé si les deux corps étaient électrisés l'un positivement, l'autre négativement. Présentons-nous un corps *c*

Fig. 137.



électrisé positivement, par exemple, à un corps conducteur, à l'état neutre? ce dernier s'électrisera par influence; l'électricité négative sera attirée en *b*, l'électricité positive repoussée en *a*. Mais l'électricité négative, plus rapprochée du corps *c*, sera la plus fortement condensée, car les forces électriques varient dans leur action, comme la pesanteur, en raison inverse du carré

Attractions
et répulsions
des
corps électrisés
non conducteurs.

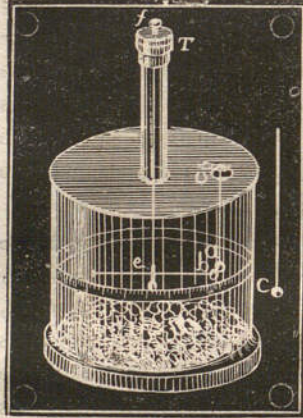
Répulsion
des conducteurs
électrisés
de la
même manière.

Attraction
des conducteurs
électrisés
inversement.

des distances. La réaction contre l'air sera donc plus grande en b qu'en a , les deux corps se rapprocheront.

226. Coulomb a étudié avec soin les lois suivant lesquelles s'attirent ou se repoussent les corps électrisés. Il s'est

Fig. 138.



Balance
électrique
de Coulomb.

servi à cet effet de sa balance de torsion décrite § 207. Le fil de torsion était plus fin, et l'aiguille aimantée remplacée par une très-mince aiguille en gomme laque $e b$, portant à son extrémité ou une balle de sureau ou un petit disque de clinquant. Une petite aiguille également en gomme laque et munie à son extrémité d'une balle de sureau ou d'un disque de clinquant, était introduite par l'ouverture o . Une troisième aiguille de gomme laque c servait à communiquer l'une ou l'autre électricité à nos deux balles. Ainsi électrisées de la même manière, elles se repoussaient, et la balle mobile s'éloignait jusqu'à ce que la répulsion, à la distance où elle se transportait, fût équilibrée par la torsion du fil. En variant cette torsion à l'aide du tambour gradué T , Coulomb modifiait à volonté les distances, et mesurait chaque fois la répulsion correspondante. La loi des attractions a été déterminée par le même physicien, en faisant osciller un petit pendule isolé électrisé d'une certaine manière à des distances variables d'une sphère inversement électrisée.

Lois
des attractions
et répulsions
électriques.

227. Coulomb a trouvé ainsi que deux corps électrisés de la même manière se repoussent, que deux corps électrisés contrairement s'attirent *en raison inverse du carré*

des distances. Il en a conclu que les *électrités* elles-mêmes ou du moins leurs éléments ou particules se repoussent ou s'attirent en raison inverse du carré des distances. Cette conclusion est vraie; elle a été vérifiée par des phénomènes nombreux et incontestables, et cependant les faits qui lui ont servi de point de départ n'ont point le degré d'exactitude que leur accordait Coulomb; de récentes expériences l'ont démontré. C'est qu'il n'existe pas, entre les actions des *électrités* et les actions des *corps électrisés*, la relation intime et directe supposée par cet éminent physicien.

228. Coulomb a également étudié, à l'aide de sa balance, le mode de distribution de l'électricité à la surface des corps. Cette distribution, variable avec les circonstances au milieu desquelles on l'observe, présente quelques particularités qu'il nous importe de connaître. Sur un corps sphérique isolé dans l'espace et soustrait à toute influence extérieure, la distribution est uniforme. Sur un corps non sphérique, mais placé dans les mêmes conditions, il n'en est plus ainsi; la tension de l'électricité en un point du corps est d'autant plus grande que la surface présente un plus grand degré de courbure en ce point. Aussi, quand un corps est terminé par une pointe, quelque faible que soit d'ailleurs sa charge électrique, l'électricité acquiert à l'extrémité de cette pointe une tension à laquelle l'air ne saurait résister : le vase est brisé, l'électricité s'échappe.

La proximité d'un corps électrisé ou non modifie encore ces résultats, *fig.* 136 et 137.

229. Les considérations qui précèdent suffisent à l'intelligence des machines électriques. La forme de ces instruments est variable; la plus généralement employée est représentée dans notre figure. Un grand plateau de verre circulaire est porté sur un axe horizontal, et peut être mis en mouvement à l'aide d'une manivelle; il passe entre

Loi
élémentaire
des actions
électriques.

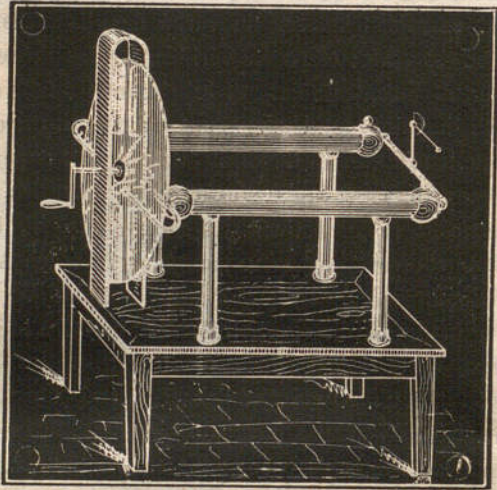
Distribution
de l'électricité
à la surface
des conducteurs.

Pouvoir
des pointes.

Machines
électriques.

deux paires de coussins situés aux deux extrémités d'un

Fig. 139.



même diamètre, et supportés par deux pièces en bois verticales. Les coussins sont en peau, garnis de crin à l'intérieur, ou mieux de huit ou neuf doubles d'une épaisse étoffe de laine, et recouverts d'une feuille d'étain et d'or mussif ou d'amalgame de zinc et d'étain, ou mieux encore d'une mousseline transformée en coton-poudre. Lorsque nous tournons le plateau, ses deux surfaces frottées par les coussins se chargent d'une forte quantité d'électricité positive, ainsi qu'on peut s'en assurer en en approchant un pendule électrique ou même simplement la main. Deux conducteurs en laiton sont placés en avant du plateau; ils sont supportés par des pieds en verre, sont réunis antérieurement par une tige transversale de laiton, et sont munis, à leur autre extrémité, de deux mâchoires garnies de pointes dirigées vers les deux faces du plateau.

L'électricité positive du plateau agit par influence sur

le fluide neutre des conducteurs, repousse l'électricité positive, et attire l'électricité négative qui, s'écoulant par les pointes sur la partie du plateau comprise entre elles, la remet à l'état neutre, et permet ainsi sa réélectrisation ultérieure par les coussins. Les conducteurs se trouvent donc ainsi chargés d'un excès d'électricité positive. Un électromètre formé d'une mince tige de bois garnie à son extrémité libre d'une balle de liège ou de sureau, et mobile autour d'un axe horizontal, accuse le degré de charge auquel ils sont arrivés.

Les phénomènes électriques précédemment décrits peuvent être tous répétés à l'aide de la machine. Les effets qu'elle produit sont beaucoup plus énergiques que ceux que l'on obtient avec de simples bâtons de verre ou de résine.

Toutes les parties des conducteurs d'une machine, à l'exception des mâchoires, doivent être arrondies, les arêtes vives, comme les pointes, donnant un facile écoulement à l'électricité. Si, dans notre machine, nous remplaçons l'électromètre que nous avons placé à l'extrémité des conducteurs par une tige terminée en pointe, ces conducteurs se chargeront peu ou point. Si nous posons sur cette pointe un fil de cuivre aiguisé à ses deux extrémités où il est recourbé en forme de S, l'électricité s'écoulera par ces deux pointes, et produira sur cet appareil, qui tournera bientôt sur lui-même, le même effet que l'eau dans le tourniquet hydraulique, *fig. 36* et § 75.

Charge
des conducteurs.

Tourniquet
électrique.

CHAPITRE III.

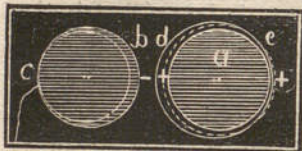
CONDENSATEURS.

230. Lorsqu'un conducteur *a*, isolé dans l'espace, a reçu une certaine quantité d'électricité positive, par exemple,

Influence
mutuelle des
corps électrisés
sur la distribution
des électricités
à leur surface.

l'agent se distribue sur ce corps d'après la forme de sa surface; il y formera, si le corps est sphérique, une couche uni-

Fig. 140.



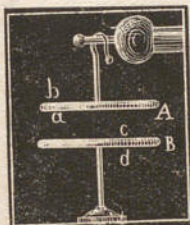
forme représentée, dans notre figure, par la ligne pointillée. Approchons alors de *a* un corps conducteur *c* mis en communication avec le sol, ce conducteur s'électrisera par influence; l'électricité positive repoussée se dispersera sur le globe; l'électricité négative viendra s'accumuler en *b*, réagira sur l'électricité positive de *a*, et en modifiera la distribution. La couche, primitivement d'une épaisseur uniforme, s'amincira en *e* et augmentera en *d*; sous l'influence réciproque des deux électricités en présence, le phénomène prendra l'aspect que présente la figure. Mais mettons en même temps le corps *a* en communication avec la source qui l'a électrisé, une machine électrique supposée maintenue à un degré de charge constant; à mesure que l'électricité se transportera de *e* en *d*, de nouvelles quantités de cet agent passeront en *a*, y accroîtront la charge, et amèneront consécutivement une distribution nouvelle sur le corps *c*, laquelle augmentera à son tour le degré d'accumulation en *d*. Finalement la charge en *e* sera la même que si le corps *a* n'eût pas été soumis à l'action de *c*; mais la charge *d* se sera accrue dans une proportion d'autant plus forte que les deux conducteurs étant plus près, leurs électricités réagiront avec plus d'énergie l'une sur l'autre.

Telle est, en quelques mots, la théorie du condensateur.

Condensateur.

231. Cet instrument, de forme très-variable, se compose essentiellement de deux feuilles ou plateaux métalliques disposés parallèlement à des distances plus ou moins grandes l'un de l'autre. L'un de ces conducteurs, le *collecteur A*, est mis en communication avec une source d'électricité que nous

Fig. 141.



supposons positive; l'autre, le condensateur B, est mis en communication avec le sol. Sous l'influence du plateau B qui s'électrisera *négativement*, le plateau A se chargera d'une quantité d'électricité positive d'autant plus grande que la distance des deux plateaux sera plus petite.

La surface *d* de notre plateau condensateur ne donnera aucun signe électrique; toute l'électricité renfermée dans ce plateau sera condensée sur la surface *c*. On dit qu'elle y est *dissimulée* par l'électricité contraire du collecteur A. Elle y est dissimulée à peu près comme l'atmosphère est dissimulée par la terre à la surface de laquelle elle est retenue, malgré la force indéfinie d'expansion dont sont doués les gaz. Comme l'électricité négative de B a modifié à son tour la distribution de l'électricité positive en A, on dit qu'elle aussi dissimule une partie de cette électricité.

232. L'électricité *dissimulée* n'a rien perdu de ses propriétés, pas plus qu'un ressort n'a perdu son élasticité sous l'action de la force qui le tend. Si le collecteur est assez chargé, ou si les deux plateaux sont assez rapprochés pour que la force avec laquelle s'attirent les deux électricités surmonte la résistance de l'air qui les sépare, une étincelle éclatera et tout rentrera à l'état neutre.

Cette résistance de l'air étant peu considérable, pour accroître la puissance du condensateur nous interposons une lame de verre entre les deux plateaux. La charge peut alors être énorme, et le condensateur devient un excellent moyen de concentrer, sur un petit espace, des quantités très-grandes d'électricité qui y demeurent assez long-temps et peuvent être transportées partout où il en est besoin.

Distribution
des électricités
sur les
condensateurs.

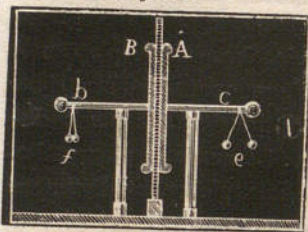
Électricité
dissimulée.

Condensateur
à lame de verre.

Influence
de la
lame de verre
sur le pouvoir
d'un
condensateur.

233. Le pouvoir d'un condensateur à lame de verre ne

Fig. 142.



dépend pas seulement de la distance des plateaux; la nature du verre y joue un rôle mal connu jusqu'en ces derniers temps. Le verre se polarise lui-même; ses deux surfaces s'électrisent contrairement aux plateaux en contact

avec elles, et agissent ainsi sur le degré de charge de ces plateaux. Aussi toutes les espèces de verre ne sont pas également propres à former des condensateurs. Les verres verdâtres paraissent les meilleurs; certaines glaces de Venise ne donnent aucun résultat.

On donne aux condensateurs des formes très-variées.

Bouteille
de Leyde.

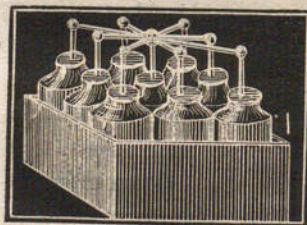
Fig. 143.



234. La bouteille de Leyde se compose d'un flacon de verre garni de deux feuilles d'étain collées sur les faces interne et externe, et appelées armatures. L'armature interne est souvent remplacée par des feuilles de clinquant dont on remplit la bouteille; elle communique avec l'extérieur au moyen d'une tige de cuivre terminée par un bouton.

L'armature externe ne recouvre pas toute la surface extérieure du verre; un espace

Fig. 144.



Batteries
électriques.

compris entre elle et la tige *b* est nu ou recouvert de vernis pour isoler plus complètement les deux électricités.

Les batteries électriques sont formées par la réunion de plusieurs bouteilles de Leyde de dimensions variables suivant la force de l'ap-

pareil, et dont toutes les armatures internes communiquent entre elles, en même temps que les armatures externes communiquent également entre elles. Une batterie est donc une grande bouteille de Leyde en plusieurs pièces.

On charge ordinairement les bouteilles et batteries en mettant en communication leurs armatures extérieures avec le sol, et leurs armatures intérieures avec les conducteurs d'une machine électrique en mouvement. Ces instruments doivent être maniés avec précaution. Une simple bouteille de Leyde ne saurait être bien dangereuse, mais il existe des batteries assez fortes pour foudroyer un homme quand elles sont bien chargées.

235. La décharge d'un condensateur peut être lente ou rapide.

Nous avons électrisé notre condensateur en mettant en communication B avec le sol, et A avec une machine électrique. Si nous l'isolons, A conservera sur toute sa surface un excès d'électricité qui fera diverger les pendules *e*, tandis que les pendules *f* seront au repos, parce que, sous l'influence de l'électricité positive, toute l'électricité négative de B est tenue condensée sur la surface en contact avec le verre. Touchons l'appareil avec le doigt en *c*, les pendules *e* retomberont au repos : une portion de l'électricité positive se sera dispersée dans le sol ; la condensation en B ne sera plus complète, et les pendules *f* divergeront à leur tour. Touchons alors l'appareil en *b*, les pendules *f* reviendront au repos, tandis que les pendules *e* divergeront de nouveau. On peut répéter un grand nombre de fois ces décharges partielles et ces alternatives de divergence et de rapprochement des pendules avant qu'elles cessent de se manifester ; mais si on touche à la fois les deux plateaux avec un corps conducteur, la décharge est instantanée et produit des effets beaucoup plus énergiques.

Charge
des bouteilles
et batteries.

Décharge lente.

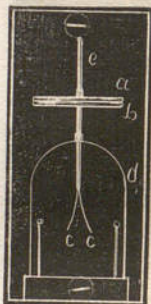
Décharge rapide.

236. Le condensateur peut également servir comme moyen d'exploration.

Électroscope
condensateur.

L'électricité apparaît dans un très-grand nombre de phénomènes, mais le plus souvent à un degré si faible qu'il serait impossible d'en constater la présence à l'aide du pendule électrique. On se sert avec avantage alors de l'élec-

Fig. 145.



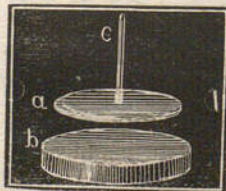
troscopie condensateur. Cet appareil se compose de deux plateaux en cuivre ou mieux en verre doré, dressés avec soin, de manière qu'ils s'appliquent exactement l'un sur l'autre, et recouverts, sur leurs surfaces en regard, d'une couche mince de vernis à la gomme laque. Le plateau supérieur est muni d'un manche de verre verni; le plateau inférieur est porté sur une cloche de verre à l'aide d'une tige de cuivre qui pénètre dans la cloche et s'y termine par deux petits rubans tirés d'une feuille d'or battu.

L'électroscope condensateur ne peut servir qu'à éprouver de petites charges, à cause de son énorme pouvoir condensant et du faible obstacle que les minces couches de vernis opposent à la réunion des deux électricités en présence. Nous aurons bientôt un exemple des applications qu'on en peut faire.

Électrophore.

237. Nous terminerons ce chapitre en faisant connaître une espèce de machine électrique qui est d'un emploi très-

Fig. 146.



commode en chimie, et qui présente de grandes analogies avec le condensateur. L'électrophore se compose d'un large gâteau de résine *b*, et d'un plateau conducteur *a* muni d'un manche isolant en verre. Battons le gâteau avec une peau de chat bien

sèche, nous l'électriserons négativement. Posons alors à sa surface le plateau *a*, touchons-le avec le doigt, puis, après avoir ôté le doigt, soulevons-le par le manche, il sera fortement électrisé positivement; notre plateau se sera exactement comporté comme le plateau condensateur. Cette expérience peut être répétée avec le même succès un très-grand nombre de fois sans recharger le gâteau de résine qui conserve son électricité pendant plusieurs jours quand le temps n'est pas trop humide.

CHAPITRE IV.

ÉTINCELLE, SES PROPRIÉTÉS.

238. La transmission des électricités, quand elle s'effectue à distance au milieu de l'air ou en général de substances mauvais conducteurs, est toujours accompagnée de bruit et de lumière; elle donne en même temps naissance à une série de phénomènes que nous allons rapidement passer en revue.

§ 1^{er}. — Effets physiologiques.

239. Chargeons les conducteurs d'une machine électrique, et approchons-en la main; cet organe, comme un corps conducteur quelconque, se chargera, par influence, d'électricité négative qui, réagissant sur l'électricité positive des conducteurs, en augmentera la condensation sur les parties les plus rapprochées de notre main. A une distance variable avec la puissance ou le degré de charge de la machine, la tension de l'électricité l'emportant sur la résistance de l'air, la décharge aura lieu; une étincelle éclatera avec un bruit sec semblable à un coup de fouet. La distance est-elle petite? l'étincelle est courte, brillante, fait peu de bruit et

Étincelle.

Commotion
produite
par l'étincelle.

nous fait éprouver le sentiment d'une vive piquûre; à mesure que l'on s'éloigne, l'étincelle s'allonge, s'infléchit capricieusement, et présente une analogie remarquable avec les éclairs. En même temps l'impression se modifie; on ressent une espèce de commotion qui se fait sentir dans la main, puis dans l'avant-bras, puis dans le bras tout entier et jusque dans la poitrine. Pour des distances plus grandes encore, et avec de puissantes machines, la commotion s'étendrait à tout le corps.

240. L'ébranlement produit dans nos organes dépend surtout de la quantité d'électricité qui les traverse au même moment; aussi les batteries qui condensent d'énormes quantités d'électricité pourraient-elles foudroyer un homme. Une simple bouteille produit déjà des effets énergiques. Lorsque plusieurs personnes se tenant par la main, forment une chaîne dont les deux extrémités sont mises en communication avec les deux armatures de cet appareil, toutes éprouvent une secousse brusque. Les personnes nerveuses doivent éviter de se soumettre à ce genre d'expérience. Leur simple présence auprès d'une machine en fonction peut les impressionner désagréablement. On ressent alors une odeur toute particulière, et on éprouve au visage et aux mains un sentiment de fraîcheur très-marqué.

§ II. — Effets chimiques.

Combustions
déterminées
par l'étincelle.

241. L'étincelle électrique jouit de propriétés chimiques importantes. Faisons-la passer au-dessus de la mèche d'une bougie que nous venons d'éteindre et qui fume encore, la bougie se rallumera à l'instant. Remplissons d'alcool, d'éther, d'une substance volatile et facilement inflammable, une petite capsule mise en communication avec le sol, et approchons-en un corps électrisé, au moment où l'étincelle jaillira la liqueur prendra feu. On peut en-

flammer de même du soufre, de la résine en poudre que l'on a posés à la surface de l'eau ; mais il faut avoir recours à l'étincelle d'une batterie assez forte. Il n'en est pas ainsi

Fig. 147.



des mélanges des gaz oxygène et hydrogène, chlore et hydrogène, qui se combinent avec la plus grande facilité. Prenons un vase métallique percé inférieurement d'une ouverture par laquelle on introduit le mélange et que l'on ferme avec un bouchon de liège, et supérieurement d'une ouverture plus petite dans laquelle on a mastiqué une tige en cuivre recourbée à son extrémité *c*. Si nous approchons la petite boule *b* du plateau chargé d'un électrophore, l'électricité ne pourra pas passer de la tige *b c* directement à l'enveloppe métallique du pistolet dont elle est séparée par un tube de verre et de la résine ; une étincelle partira entre les points *c* et *d*, le mélange s'enflammera et donnera lieu à une forte explosion. L'azote et l'oxygène de l'air humide se combinent également, mais sous l'influence d'une longue série d'étincelles. Inversement, des étincelles nombreuses finissent par décomposer des hydrogènes carboné ou sulfuré, l'ammoniaque, un grand nombre de substances salines, et même l'eau. Les bromure, iodure et chlorure d'argent sont très-sensibles à leur action. Si nous appliquons deux pointes métalliques à peu de distance l'une de l'autre sur une feuille de papier enduite de l'un de ces composés, et que, par ces pointes, nous faisons écouler les deux électricités, une tache noire d'argent revivifié se déposera à la pointe négative, tandis qu'à la pointe positive apparaîtra le métalloïde.

Pistolet.
de Volta.

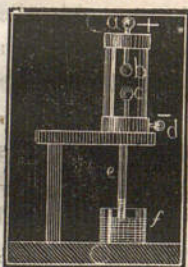
Combinaison
des mélanges
d'hydrogène
et d'oxygène
ou de chlore.

Décompositions
produites
par l'étincelle.

§ III. — Effets calorifiques et mécaniques.

242. Les effets chimiques produits par l'étincelle sont-ils dus à une élévation de température aux points traversés par l'étincelle, ou par une action *sui generis*? c'est ce qu'il est assez difficile de décider. Au reste, les analogies très-grandes que l'on remarque partout entre la chaleur, la lumière et l'électricité en mouvement, font soulever à chaque pas cette question, et amènent toujours la même incertitude dans la réponse. La même difficulté se présente quand il s'agit d'un grand nombre d'autres effets produits par l'électricité.

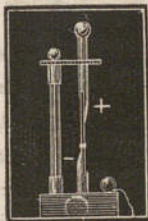
Fig. 148.



243. Prenons un tube de verre fermé à ses deux bouts par des montures en cuivre traversées par des tiges métalliques *ab* et *cd*, et dont la monture inférieure est munie d'un tube de verre qui établit une communication entre l'intérieur de cet appareil et l'air extérieur. Renversons cet appareil de manière que l'extrémité du tube *e* affleure la surface de l'eau contenue dans le vase *f*; puis faisons passer une forte étincelle entre les deux boules *b* et *c*. L'air sera refoulé brusquement par l'action de cette étincelle; une bulle s'échappera par l'extrémité inférieure du tube *e*, et sera remplacée par une colonne d'eau qui s'y élèvera d'une manière permanente, et rendra ainsi sensible l'effet produit. Est-ce un effet purement mécanique? Est-ce un effet de dilatation? Nous pencherions pour la dernière hypothèse. Il en est de même des effets suivants. Faisons partir de fortes étincelles entre deux boules formées de métaux

différents : des parcelles métalliques fondues seront transportées de l'une à l'autre et s'y incrustent fortement. Des fils métalliques, de minces lames d'or, peuvent être volatisés ou réduits en poussière de la même manière. Si les ébranlements moléculaires produits dans ces cas ne

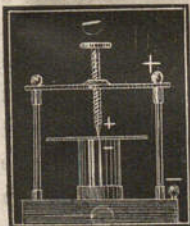
Fig. 149.



sont pas de nature calorifique, ils n'en sont pas très-éloignés. Nous verrons, du reste, que des mouvements plus continus d'électricité au travers des corps y déterminent des élévations de température très-marquées et souvent même considérables.

244. D'autres effets, au contraire, paraissent purement mécaniques. Une étincelle traversant une carte y perce une ouverture bordée d'un

Fig. 150.



petit bourrelet de papier sur les deux faces de la carte, comme si la force perforante partait du milieu même de l'épaisseur du papier. L'ouverture est, en outre, toujours plus près de la pointe négative que de la pointe positive, si ce n'est dans le vide où elle se trouve à égale distance des deux. L'étincelle perce ainsi

le bois, le verre, etc.

Perce-carte.

Perce-verre.

§ IV. — Effets lumineux.

245. L'intensité lumineuse de l'étincelle dépend de circonstances assez diverses, telles que la nature, la distance des corps entre lesquels elle éclate, la nature et la densité du milieu où elle apparaît, la quantité de l'électricité qui la produit. Toutes choses égales d'ailleurs, cette intensité croît proportionnellement à la longueur de l'étincelle et à la quantité des électricités qui se réunissent à un moment

Intensité
de la lumière
électrique.

donné pendant l'explosion; et comme pour qu'une étincelle parte entre deux corps, il faut que leur degré de charge soit proportionnel à leur distance, l'éclat de l'étincelle varie, dans ces cas, proportionnellement au carré de sa longueur. Au reste, la lumière électrique jouit à peu près de toutes les propriétés de la lumière ordinaire, ainsi que nous le verrons plus loin.

Étincelle
dans l'air.

Étincelle
dans le vide.

Oeuf électrique.



246. Dans l'air, l'éclat de l'étincelle est d'autant plus vif que la densité du gaz est plus grande, et il en est de même pour un gaz quelconque. Il n'est pas nul cependant au milieu du vide le plus parfait que nous puissions produire, le vide barométrique.

Prenons un vase ovoïde en verre muni à ses deux extrémités de deux tubulures garnies de douilles en cuivre, dont une à robinet. Mettons la monture supérieure en communication avec une machine électrique en fonction, et l'autre avec le sol, puis faisons graduellement le vide; l'étincelle qui part entre les deux boules *c* et *d* deviendra de plus en plus pâle; mais en même temps elle se dilatera de plus en plus jusqu'à remplir presque entièrement l'appareil. A mesure qu'elle s'affaiblit et se dilate, l'étincelle change de couleur et prend toutes les nuances du blanc éblouissant à un violet pâle, en passant par le rouge.

Jeux de lumière
électrique.

247. Tous les jeux de lumière électrique dans l'air reposent sur un même principe qui consiste à multiplier les étincelles en faisant parcourir au fluide électrique une série de conducteurs discontinus, séparés par des intervalles très-petits et formant des dessins variés. A chaque étincelle, chaque solution de continuité est marquée par un point brillant, et le dessin est illuminé dans tous ses détails.

248. La durée de la lumière de l'étincelle est infiniment courte, bien qu'elle produise sur nos yeux une impression persistante. Ce dernier effet est un résultat purement physio-

Durée
de l'étincelle.

Fig. 152.



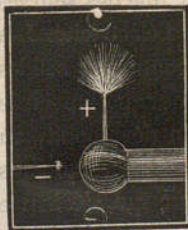
logique. Si nous traçons, en effet, sur un disque de papier blanc collé sur un carton, une série de secteurs alternativement blancs et noirs, que nous imprimions au disque un mouvement de rotation très-rapide, et que, le plaçant dans l'obscurité, nous l'éclairions subitement par une étincelle, les secteurs nous

apparaîtront immobiles et nettement tranchés. Quelque précipitée que soit leur course, ils n'auront pas eu le temps de se déplacer d'une quantité appréciable pendant la durée de l'étincelle.

249. L'écoulement de l'électricité par les pointes donne, dans l'obscurité, des résultats différents, suivant que ces pointes sont positives ou négatives. Sont-elles en communication avec les conducteurs d'une

Aigrette positive.

Fig. 153.



machine électrique? on aperçoit une aigrette lumineuse divergeant du sommet de la pointe. Mises en communication avec le sol, sont-elles présentées aux conducteurs de la machine? elles seront surmontées d'une auréole seulement. Cette diversité d'aspects se rattache à

Auréole négative.

une autre expérience intéressante. Promenons sur un gâteau de résine, d'abord l'armature positive, puis l'armature négative d'une bouteille de Leyde, et projetons sur le gâteau, avec un petit soufflet, un mélange de soufre et de minium en poudre; ces deux poudres, électrisées diversement par leur frottement mutuel, se répandront, le soufre sur les dessins formés avec l'électricité positive, le minium

Figures
de Lichtenberg.

sur les dessins formés avec l'électricité négative. Les lignes jaunes qui en résultent apparaissent hérissées de filets divergents, tandis que les lignes rouges ont leurs contours arrondis et mieux définis.

CHAPITRE V.

SOURCES D'ÉLECTRICITÉ.

250. Les circonstances au milieu desquelles se développent les forces électriques sont très-multipliées, ainsi que nous l'avons observé déjà. Les actions physiologiques, chimiques, physiques, mécaniques, qui, à des degrés variables, jouent un rôle dans tous les phénomènes de la nature, peuvent leur donner naissance. Le domaine de l'électricité est donc immense : nous devons nous restreindre considérablement ici.

Frottement.

251. Le frottement mutuel des corps solides auquel seul nous avons eu recours jusqu'à présent, est une des sources les plus puissantes et les plus constantes d'électricité. Les gaz, quand ils sont soufflés avec force contre les solides ou les liquides, ne paraissent pas en fournir; mais le frottement des liquides contre les solides en développe, au contraire, des quantités considérables quand il a lieu dans des conditions favorables. Ainsi, la vapeur qui s'échappe d'une chaudière à haute tension est fortement électrisée quand elle entraîne avec elle des gouttelettes liquides; il en est de même du mercure qui a filtré au travers d'une peau de chamois.

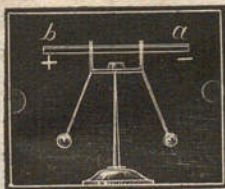
Pression.

En pressant l'un contre l'autre deux corps dont l'un au moins est mou, élastique et mauvais conducteur ou du moins isolé, il y a toujours quelque développement d'électricité : l'un prend l'électricité positive, l'autre l'électricité

négative. Le carbonate de chaux cristallisé ou spath d'Islande, comprimé ainsi entre les doigts, s'électrise d'une manière très-marquée, et conserve long-temps ses propriétés électriques. La rupture, le clivage des corps, produisent encore des résultats semblables. On a considéré enfin le simple contact des métaux comme une des causes les plus actives de développement des forces électriques. Nous sommes loin de partager cette dernière opinion; le contact des corps conducteurs hétérogènes est une cause prédisposante, et non une cause active. La cause active est tantôt la chaleur, tantôt une action chimique, tantôt même une simple action mécanique.

252. La chaleur, en effet, développe les propriétés électriques dans plusieurs corps considérés même isolément. Prenons, par exemple, un cristal de tourmaline, substance dans laquelle le phénomène est le plus marqué, et chauffons-le; pendant tout le temps que sa température montera, il restera polarisé comme un conducteur isolé électrisé par influence. Il en sera de même encore pendant la durée

Fig. 154.



de son refroidissement, seulement les pôles seront renversés; en sorte que, si nous le suspendons sur une pointe d'acier à l'aide d'une chape d'agate, et que nous présentions successivement à ses deux extrémités l'un des bouts d'un autre cristal de tourmaline également en voie de refroidissement, l'une d'elles sera attirée, l'autre repoussée, comme nous l'avons vu pour les aiguilles aimantées. La chaleur développe encore de l'électricité dans d'autres conditions; mais, pour le constater, il faut avoir recours à des instruments que nous décrirons plus loin.

253. Les actions chimiques sont la principale origine

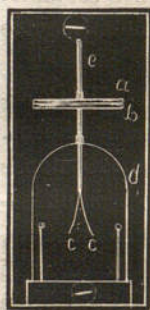
Percussion,
rupture,
clivage,
contact.

Chaleur.

Actions
chimiques.

des effets électriques aujourd'hui si variés, si utiles à l'industrie, et souvent si énergiques de la pile. C'est à elles qu'il faut attribuer encore l'énorme quantité d'électricité toujours répandue dans l'atmosphère, même aux temps les plus froids et les plus sereins, et qui se manifeste à nos yeux d'une manière si imposante et si terrible au milieu des orages. Plongeons, par exemple, l'extrémité d'une lame de zinc dans un acide étendu, ou enveloppons-la d'un papier mouillé avec cet acide, l'acide s'électrifiera

Fig. 155.



Action
des acides
sur les métaux.

positivement, et le zinc négativement, ainsi que nous pouvons le démontrer à l'aide du condensateur de Volta. A cet effet, nous prenons notre lame de zinc entre les doigts par l'extrémité recouverte du papier mouillé d'acide, et nous touchons avec l'autre extrémité le plateau inférieur de l'électromètre condensateur dont le plateau supérieur est mis en communication avec le sol. Aucun effet appréciable n'est produit sur les lames d'or : la tension de l'électricité dégagée dans ce cas est trop faible. Mais le condensateur a précisément pour but de l'accroître dans une proportion très-forte ; aussi enlevons notre lame, soulevons le plateau supérieur, immédiatement les lames d'or divergeront sous l'action de l'électricité *negative* que leur a transmise le zinc. Opérons d'une manière inverse, appliquons le papier mouillé sous le plateau inférieur, touchons-le avec le zinc tenu directement entre les doigts, les lames d'or divergeront encore, mais cette fois ce sera de l'électricité *positive* que l'acide leur aura fournie. La plupart des métaux peuvent s'électrifier ainsi, mais à des degrés divers : le zinc fortement, le platine, l'or, l'argent, le cuivre d'une manière beaucoup plus faible. Ce phéno-

mène important nous servira de point de départ dans l'exposition de la théorie de la pile voltaïque.

Posons sur l'un des plateaux de notre condensateur un charbon bien allumé, ou l'extrémité d'un fil de platine contourné en une hélice dont nous enveloppons la flamme d'une bougie ou d'une lampe à alcool, nous recueillerons encore, dans le premier cas, de l'électricité négative; dans le second, de l'électricité positive.

Combustion
des corps.

La vaporisation d'un liquide tenant en dissolution une substance étrangère dont il doit se séparer pendant que le changement d'état s'effectue, dégage aussi de l'électricité, et ce phénomène, qui se produit dans la nature sur une immense échelle, fournit à l'atmosphère la plus grande partie de l'électricité qu'elle contient.

Évaporation.

254. Enfin, le magnétisme lui-même peut mettre en jeu l'électricité, de même que l'électricité peut développer à son tour le magnétisme, ainsi que nous le verrons plus loin.

Magnétisme.

255. Nous terminerons cet énoncé rapide et sommaire des circonstances au milieu desquelles apparaissent les forces électriques, en disant qu'elles nous offrent avec les forces vitales de mystérieux rapports que la science n'est point encore parvenue à définir. Les animaux dégagent sans cesse de l'électricité pendant leur vie, et, après leur mort, ce phénomène persiste encore quelque temps. Quelques-uns même, tels que le gymnote et la torpille, sont doués d'un appareil spécial excréteur et condensateur de l'agent électrique dont ils se servent comme moyen de défense ou d'attaque. Nous analysons, dans un autre ouvrage déjà cité, les travaux des physiciens et des physiologistes sur ce sujet si difficile et si élevé.

Actions vitales.

CHAPITRE VI.

DE LA PILE VOLTAÏQUE.

256. La pile voltaïque, ainsi désignée du nom de son inventeur, Volta, nous offre, dans son histoire, un exemple remarquable de la marche de l'esprit humain dans l'étude des phénomènes physiques, depuis qu'abandonnant la stérile splendeur de la philosophie déductive, il cherche à comprendre la nature par ses œuvres, et non plus à la deviner dans sa cause.

Découverte
de Galvani.

257. Galvani, qui déjà, en 1790, avait fait de nombreuses recherches pour découvrir la nature et les lois de la force mystérieuse cause ou agent du développement de la vie dans les êtres organisés, crut reconnaître qu'il existait des rapports intimes entre cette force et les forces électriques. Dans son opinion, chaque animal devait posséder une électricité propre sécrétée dans le cerveau et distribuée dans tout le système nerveux. Retenue par le névrilème, enveloppe non conducteur de l'électricité, elle réagissait sur l'électricité des muscles; en sorte que l'animal, espèce de bouteille de Leyde, renfermait toujours une charge plus ou moins forte d'électricité dont l'existence pouvait être

Électricité
animale.

Fig. 156.



facilement constatée sur une grenouille. Coupons, en effet, par le milieu du corps un de ces animaux bien vivant, dépouillons-en rapidement les membres postérieurs, et mettons à nu les nerfs lombaires que nous verrons apparaître sous forme de cordons blanchâtres, le long des dernières vertèbres dorsales; prenons alors un arc métallique formé d'une lame de cuivre et d'une lame de zinc mobiles à charnière

autour de leur point de jonction, suspendons la grenouille par ses nerfs lombaires à l'une de ces lames, et touchons avec l'autre les muscles de l'animal : à chaque contact, nous verrons celui-ci se raidir convulsivement. La bouteille de Leyde se décharge alors, suivant Galvani, et l'électricité, mise en mouvement, produit ces commotions.

Galvani avait deviné un coin de la vérité; l'état de la science ne lui permettait pas d'aller plus loin.

258. Volta, à qui d'autres études avaient donné des préoccupations différentes, transporta la cause des commotions de la grenouille à l'arc métallique. C'est le contact des deux métaux zinc et cuivre qui produirait l'électricité qu'il en-

Fig. 157.



levait à la grenouille; il démontra, en effet, qu'un couple de deux métaux zinc et cuivre soudés ensemble pouvait charger le condensateur.

Volta, tout en niant un fait vrai, l'existence constante, dans les animaux, des forces électriques, quel qu'en soit, du reste, le rôle, a cependant fait faire un grand pas à la science. Sa manière d'envisager les phénomènes électro-physiologiques le conduisit, en effet, à la découverte de la pile à laquelle la reconnaissance des physiiciens a conservé son nom, malgré les transformations qu'elle a subies.

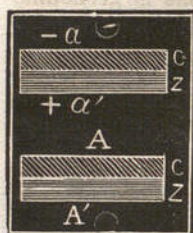
259. D'après Volta, le seul contact de deux métaux développe en eux une force *électromotrice* modifiant la distribution des forces électriques à leur surface, de telle sorte que la différence de leurs charges reste *toujours constante* pour un même couple.

Prenons deux disques égaux de zinc et de cuivre, soudons-les ensemble comme l'indique la *figure 158*. Si ce couple est isolé, le cuivre se chargera d'une quantité $-a$ d'électricité négative, le zinc se chargera d'une quantité d'électricité positive $+a'$. La différence de ces deux charges sera égale

Théorie
de Volta
ou du contact.

Force
électromotrice
de Volta.

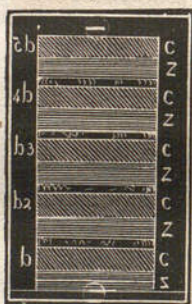
Fig. 158.



à $+a' - (-a) = a' + a = b$. Mettons maintenant notre couple en contact avec une source d'électricité quelconque, positive par exemple, un nouvel état d'équilibre se produira ; le cuivre prendra une quantité A d'électricité positive, et le zinc une quantité d'électricité positive A' plus grande que A , de telle sorte que l'on ait encore $A' - A = b$. Si la source était négative, au contraire, A serait plus grand que A' d'une quantité égale à b .

Pile de Volta
ou pile à colonne.

Fig. 159.



260. Tel est le principe fondamental de la théorie adoptée par Volta pour sa pile. Nous ajouterons toutefois que, d'après cet illustre physicien, le contact des métaux avec les acides ne développe qu'une force électromotrice insignifiante ou nulle. Cela posé, ayons une centaine de couples analogues au précédent ; disposons un premier couple, le zinc en dessous, sur une table qui fasse communiquer ce zinc avec le sol, puis sur ce premier couple une rondelle de drap imbibée d'un acide étendu, au-dessus un second couple dont les éléments sont disposés de la même manière, puis une rondelle humide, puis un couple, etc. :

la force électromotrice du premier couple développera les forces électriques ; la force positive du zinc se répandra dans le sol, la force négative du cuivre dans les rondelles et couples qui sont situés au-dessus ; un effet analogue se produira dans tous les autres, et nous aurons finalement sur le premier cuivre c une quantité d'électricité égale à b , sur le second cuivre une quantité d'électricité égale à $2b$... Un zinc quelconque restera chargé comme le cuivre immédiatement au-dessous. Quelque faibles que soient la

force électromotrice et la charge b , celle-ci, croissant ainsi d'une manière continue avec le nombre des couples, pourra devenir très-appréciable. En effet, si nous touchons le dernier couple avec le doigt mouillé, nous ressentirons une petite commotion d'autant plus sensible que le nombre de couples sera plus grand. La charge était négative; elle serait positive si la pile eût été montée en sens inverse ou les cuivres en dessous. Isolée, la pile serait négativement chargée à l'extrémité terminée par un cuivre, et positivement à l'extrémité terminée par un zinc. Dans ce cas, elle serait polarisée comme l'aimant, comme un corps conducteur isolé électrisé par influence; aussi ses deux extrémités s'appellent-elles *pôles*: l'une pôle positif, l'autre pôle négatif.

La pile a sur les machines cet inestimable avantage qu'elle se charge d'elle-même et avec une très-grande rapidité, en sorte que les commotions peuvent être très-fréquemment répétées, et que, si on en réunit les deux extrémités par un corps conducteur, ce conducteur sera incessamment traversé par un *courant* électrique continu.

261. Depuis Volta, des expériences nombreuses sont venues, de tous les points du monde savant, éclairer la théorie de la pile aujourd'hui si répandue, si féconde pour la science, si pleine d'espérances pour l'industrie. La théorie de Volta a souffert du jour nouveau répandu sur son magnifique appareil. On a été injuste envers cet homme illustre, comme il l'avait été envers Galvani. Ainsi va la science: on honore les hommes qui ont embelli, agrandi son domaine; on sacrifie impitoyablement leurs idées dès qu'elles paraissent avoir rendu les services qu'on en pouvait attendre. Nul ne saurait s'en plaindre: c'est là un indice, une condition de progrès. Les théories sont des instruments entre les mains de l'homme. La vérité, but

Pôles
de la pile.

Courant
de la pile.

unique et constant de nos efforts, les domine et les emporte comme le vent disperse les feuilles qui languissent et meurent quand elles ont accompli leur évolution, que leur but est atteint.

Théorie
électrochimique
de la pile.

262. La force électromotrice a été déplacée à son tour : c'est dans l'action de l'acide sur le métal le plus facilement attaqué qu'on l'a placée de nos jours. La vérité, nous le croyons, n'est ni avec l'une ni avec l'autre de ces manières de voir. Le contact constitue un état et non une force active ; d'un autre côté, si les actions chimiques sont une force, elles ne possèdent rien en elles qui puisse déterminer le sens dans lequel se meut l'agent électrique. La force active réside donc dans l'action chimique, la force directrice dans la dissymétrie des surfaces de contact des corps hétérogènes solides ou liquides. Aussi les actions chimiques ne sont-elles pas seules des sources de courants électriques : la chaleur, certaines actions mécaniques, les forces capillaires, les forces vitales, peuvent en faire naître, si, sur le trajet qu'ils doivent parcourir, se rencontrent des surfaces dissymétriques que l'électricité traverse avec une inégale facilité dans un sens et dans l'autre.

Dans la théorie électro-chimique de la pile, l'acide agissant sur un métal lui prend de l'électricité positive, et lui laisse de l'électricité négative, que ce métal soit du cuivre ou du zinc ; mais comme l'action sur le zinc l'emporte de beaucoup sur l'autre, c'est elle qui règle, en définitive, la direction du courant. Cette direction est la même que dans la théorie du contact, et cela doit être, puisque les faits sont indépendants des théories qui les relient.

Diverses piles.

263. Les piles ont été modifiées de mille manières ; mais comme, pour comprendre la valeur de ces modifications, il nous faut connaître d'abord les propriétés des courants et les lois de leur production et de leur propagation, c'est par celles-ci que nous commencerons.

CHAPITRE VII.

EFFETS DE LA PILE.

Le passage du courant au travers du conducteur qui réunit les deux pôles d'une pile, et au travers de la pile elle-même, peut être accusé par divers phénomènes que nous allons successivement passer en revue.

Conducteur
interpolaire.

§ 1^{er}. — *Effets physiologiques.*

264. Touchons avec les doigts humides les deux pôles d'une pile, de manière que nos organes fassent l'office de conducteur interpolaire, nous éprouverons une commotion faible si la pile est faible elle-même, mais pouvant devenir foudroyante avec certaines piles que nous apprendrons à construire. La commotion dure tant que dure le contact, la pile se rechargeant d'une manière continue; elle est cependant en général plus forte au commencement et à la fin de l'expérience. Le courant traverse-t-il la tête? suivant la partie qu'il en parcourt plus spécialement, l'ouïe, la vue, le goût, sont affectés fortement, chacun suivant sa spécialité: on entend un bruit plus ou moins intense, des éclairs traversent les yeux, ou on ressent une saveur métallique insupportable. L'excitation nerveuse qui est produite par le passage de l'électricité au travers de nos organes, les modifications encore inconnues dans leur nature qu'elle y détermine, ont été souvent employées comme moyen curateur, quelquefois avec succès, mais malheureusement le plus souvent d'une manière infructueuse ou funeste. Cet intéressant sujet demanderait donc des recherches nouvelles et nombreuses.

Commotion
voltaïque.

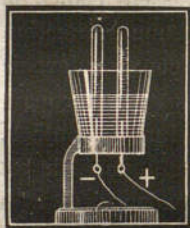
§ II. — Effets chimiques.

Décomposition
de l'eau.

265. Les effets chimiques de la pile sont extrêmement variés; le premier découvert a été la décomposition de l'eau.

L'eau pure est un très-mauvais conducteur de l'électricité de la pile, le courant la traverse avec une grande difficulté; mais si on l'aiguise avec quelques gouttes d'acide, ou si on y dissout quelque substance saline, elle devient bon conducteur, le courant s'y propage, et alors apparaissent des phénomènes de décomposition remarquables.

Fig. 160.



Voltaimètre.

Prenons une espèce d'entonnoir en verre, bouché à son extrémité inférieure par un liège enduit de mastic, et traversé par deux fils de platine qui s'élèvent à quelques centimètres au-dessus du liège; versons dans ce vase de l'eau acidulée, renversons-y deux petites éprouvettes graduées remplies du même liquide et recouvrant chacune l'extrémité de l'un des deux fils; puis mettons en communication l'un des fils avec le pôle positif, l'autre avec le pôle négatif de la pile: immédiatement nous les verrons se recouvrir d'une infinité de petites bulles de gaz qui, s'en détachant, viendront se réunir au sommet des éprouvettes. Sur les fils seuls se concentrent les phénomènes produits, et, dans tout le reste de la masse liquide, bien qu'elle soit certainement traversée par le courant, on ne distingue rien qui accuse la présence de celui-ci.

Électrodes.

Au bout de quelques instants, nous reconnaitrons que l'électrode négatif donne plus de gaz que l'électrode positif; et dès que nous pourrons comparer leur volume au moyen des divisions des cloches, nous verrons qu'il est dans le

rapport de 2 à 1. En examinant ces gaz au moyen des procédés de la chimie, nous pourrions constater que l'un d'eux est de l'hydrogène pur, et l'autre de l'oxygène également pur. Mélangeons-nous les gaz ainsi produits par la pile, et faisons-nous traverser le mélange par une étincelle, tout disparaît transformé en eau. La pile décompose donc l'eau en ses deux éléments constitutifs : oxygène 1, hydrogène 2.

266. Ce résultat est modifié par la présence, au milieu du liquide conducteur, d'une substance capable de fournir des gaz par sa décomposition propre, ou d'absorber l'un ou l'autre des gaz de l'eau. Opérons, par exemple, avec une dissolution dans l'eau d'un sel de cuivre, d'argent, d'or, l'hydrogène disparaîtra ; il sera employé à réduire le métal qui se déposera sur l'électrode négatif. Opérons, au contraire, avec des fils de fer, de zinc ou d'un métal facilement oxydable quelconque, la quantité d'oxygène produite diminuera ou disparaîtra entièrement, et l'électrode positif se dissoudra ou s'oxydera rapidement, ou bien de nouveaux produits plus oxygénés se formeront dans la liqueur autour de cet électrode. La dissolution contient-elle de l'acide chlorhydrique étendu ? du chlore apparaîtra sur le fil positif en même temps que l'oxygène, tandis que du chlore seul s'y déposera si l'acide chlorhydrique est plus concentré.

Nous ne pourrions suivre dans tous leurs détails les modifications apportées dans les actions chimiques par les circonstances au milieu desquelles elles se produisent. Nous examinerons à part les applications industrielles de l'action chimique des courants ; nous dirons seulement ici que c'est à l'aide d'une pile de trois mille éléments que Davy parvint à décomposer, pour la première fois, la soude, la potasse et les autres bases alcalines regardées jusqu'à cette époque comme indécomposables.

Décomposition
des acides,
des bases
et des sels.

267. La propriété chimique appartient au courant dans tous ses points; ou, du moins, en quelque endroit de son trajet qu'un liquide décomposable soit en contact avec un corps solide, une action chimique a lieu, variable, du reste, suivant la nature des substances en contact. Ces actions se manifestent donc au sein même de la pile, et, suivant leur nature, favorisent ou contrarient le jeu de cet appareil.

§ III. — *Effets calorifiques et lumineux.*

Effets
calorifiques.

268. La transmission d'un courant est toujours accompagnée d'un dégagement de chaleur. Souvent faible ou insensible quand le courant est faible, la section du conducteur grande, ou que les gaz formés emportent à mesure qu'elle se forme la chaleur produite, elle devient, dans certains cas, assez grande pour fondre et faire couler comme du plomb le platine qui a jusqu'à présent résisté à nos foyers de chaleur les plus ardents. Les lames d'étain, les feuilles d'or, d'argent, de cuivre....., brûlent ainsi en donnant naissance à des étincelles diversement colorées. Une pile formée de couples un peu grands mais en petit nombre, suffit pour produire ces effets sur des fils de petites dimensions. Lorsque le fil est rougi sans se fondre, il conserve cette température élevée tant que la communication des pôles a lieu, ce qui fournit une nouvelle preuve de la permanence du courant électrique.

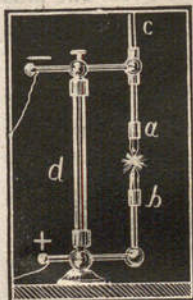
Effets
lumineux.

269. Une semblable pile est également suffisante pour produire les effets lumineux. Mettons l'un des pôles de cette pile en communication avec une lime, et frottons l'autre pôle sur la surface de cette lime, nous verrons jaillir des étincelles; mais c'est surtout lorsque le courant passe entre deux pointes de charbon suffisamment rapprochées que l'intensité de la lumière produite est vraiment remarquable :

c'est la seule lumière artificielle dont l'éclat puisse être comparé avec l'éclat du soleil.

Le meilleur charbon que nous puissions employer pour ce genre d'expériences est celui que l'on retire des cornues qui servent à préparer le gaz de l'éclairage. Taillons deux petites baguettes dans un semblable morceau de charbon, et, après les avoir terminées en pointe, introduisons-les

Fig. 161.



dans les deux viroles *a* et *b* d'un appareil semblable à celui qui est représenté dans notre figure, et dans lequel la tige *d*, qui sépare les deux parties métalliques de l'instrument, est en verre. Mettons d'abord les deux charbons en contact, et faisons passer de l'un à l'autre le courant de la pile la plus forte dont nous pourrions disposer; bientôt nous verrons apparaître entre eux un point lumineux très-

intense; ce point s'élargit peu à peu, et, si nous éloignons alors graduellement les deux charbons, l'arc lumineux s'allonge et peut acquérir une longueur de quelques millimètres et même de plusieurs centimètres; dans ce dernier

Fig. 162.



cas, la lumière est assez vive pour permettre de lire dans un livre à une distance de plusieurs centaines de mètres.

270. Si nous voulons produire de grands effets de chaleur, nous creuserons l'un des charbons en forme de petite coupelle, dans laquelle nous placerons des fragments du métal que nous voulons fondre. Le courant passant comme dans l'expérience précédente, il nous suffira de quelques secondes pour fondre une pièce d'argent ou d'or, et même des fragments de platine de 10 à 12 grammes ou davantage si la pile

Lumière
électrique.

Fusion des corps
par les courants.

est plus forte. La lumière est encore très-éclatante alors, mais elle est colorée par l'influence des particules métalliques qui sont entraînées par le courant.

Le fer et l'acier ne sont pas seulement fondus dans ces expériences, mais ils prennent feu au contact de l'air, et brûlent en lançant des gerbes éblouissantes, comme s'ils étaient dans de l'oxygène pur.

Charge
du condensateur
par la pile.

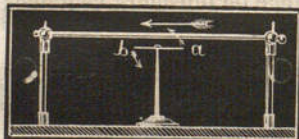
271. On peut donc reproduire, et même avec une plus grande intensité, tous les phénomènes que nous avons vus apparaître avec l'électricité des machines électriques. On peut même charger une batterie avec la pile. Dans ce cas, la charge est pour ainsi dire instantanée, et d'autant plus forte que le nombre des couples est plus grand.

CHAPITRE VIII.

ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

272. Nous avons vu déjà, § 199, que les orages ont une influence marquée sur la boussole ; l'action exercée par les courants sur l'aiguille aimantée n'est pas moins remar-

Fig. 163.



Direction
de l'aiguille
aimantée
par le courant.

quable. Tendons horizontalement sur deux supports un fil de cuivre, dirigeons-le dans le plan du méridien magnétique, et plaçons au-dessous une aiguille aimantée suspendue sur son pivot : l'aiguille et le fil seront parallèles. Faisons alors passer un courant au travers de celui-ci ; immédiatement l'aiguille sera déviée, d'autant plus que le courant sera plus énergique. Plaçons notre fil dans une position horizontale encore, mais inclinée sur le méridien magnétique, et répétons l'expérience ;

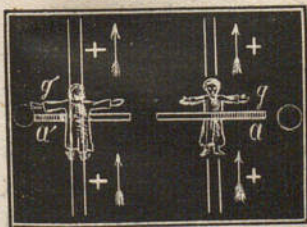
quel que soit l'angle que fait l'aiguille avec le fil avant que le courant passe, une déviation aura lieu encore, d'autant plus faible toutefois que cet angle aura été plus près de 90° , cas dans lequel la déviation sera nulle. Le courant tend donc à mettre l'aiguille *en croix* et à *angle droit* avec lui. S'il ne le fait pas d'une manière complète, c'est à l'action de la force directrice terrestre qu'il faut l'attribuer. Aussi le phénomène est-il entier toutes les fois que l'influence du globe est neutralisée d'une manière quelconque.

273. Le résultat qui précède est constant, mais le sens de la déviation varie avec la direction du courant et avec sa position au-dessus ou au-dessous de l'aiguille. M. Ampère a résumé ainsi qu'il suit tous les cas qui peuvent se présenter.

Le courant étant supposé aller *du pôle positif au pôle négatif* au travers du conducteur interpolaire, imaginons qu'une petite figure ait été posée sur ce conducteur, de telle sorte que le courant la parcoure des pieds à la tête; imaginons de plus que cette figure ait toujours la face tournée vers l'aimant sur lequel agit le courant; la *droite* et la *gauche* du courant seront représentées par la droite et la gauche de l'image. Ces conventions étant admises,

Sens
du courant.

Fig. 164, 165.



nous pourrons dire que le *courant dévie à sa gauche le pôle austral de l'aiguille qu'il tend à mettre en croix avec lui*. Le courant est-il au-dessus de l'aimant, *fig. 164*? sa gauche est en *g'*; le pôle austral sera chassé en *a'*. Le courant, est-

Droite et gauche
du courant.

Le courant
dévie le pôle
austral
à sa gauche.

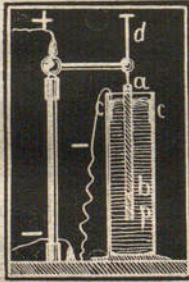
il, au contraire, au-dessous de l'aimant, *fig. 165*? sa gauche est en *g*, et le pôle austral est rejeté en *a*. Dans les deux cas, changeons la direction du courant, la figure

est renversée, sa droite prend la place de sa gauche, la déviation change de sens.

Attraction
et répulsion
des aimants
par les courants.

274. Outre cette direction des aimants par les courants, l'action de ceux-ci sur ceux-là donne aussi lieu à des phénomènes d'attraction et de répulsion. Plaçons au-dessus de notre conducteur une aiguille à coudre aimantée suspendue verticalement à un fil; dès que le courant passera, l'aiguille sera chassée tout entière d'un côté ou de l'autre, suivant la nature du pôle qui est situé à son extrémité inférieure, et suivant la direction du courant. Posons notre aiguille sur un liège que nous placerons lui-même sur l'eau, et présentons-lui un courant dirigé à angle droit avec elle. Si ce courant a le pôle austral de l'aiguille à sa gauche, cette aiguille sera attirée dans le sens de sa longueur, et viendra se placer sous le conducteur en restant en croix avec lui; si on change alors la direction du courant de manière qu'il ait le pôle austral à sa droite, l'aiguille sera repoussée en même temps que déviée de sa direction. On peut même imprimer un mouvement de rotation continu à un aimant, au moyen des courants. Un aimant cylindrique, lesté à l'un de ses bouts avec un cylindre de platine du même diamètre, et creusé à son autre extrémité en forme de godet, plonge dans une éprouvette remplie de mercure, et s'y tient dans une position verticale; nous versons une goutte de mercure dans le godet *a*, nous y faisons plonger l'extrémité d'une tige pointue *d* mise en communication avec le pôle positif d'une pile, puis nous complétons le circuit à l'aide d'un anneau en cuivre *cc* communiquant avec le pôle négatif de la pile, et baigné par le mercure de l'éprouvette. Dès que le courant passe,

Fig. 166.



Rotation
des aimants
sous l'influence
des courants.

complétons le circuit à l'aide d'un anneau en cuivre *cc* communiquant avec le pôle négatif de la pile, et baigné par le mercure de l'éprouvette. Dès que le courant passe,

nous voyons l'aimant tourner rapidement sur lui-même dans une direction que nous pouvons renverser, soit en renversant le sens du courant, soit en changeant la nature du pôle supérieur de notre aimant. Ce phénomène est une conséquence de ceux dont Ampère a donné la formule, § 273.

275. L'action directrice exercée par un courant sur un aimant a fourni à la science un de ses instruments les plus délicats. Voulons-nous, en effet, savoir si un conducteur est traversé par un courant? présentons-le à une aiguille aimantée; si celle-ci est déviée, l'existence du courant est incontestable. Mais cette action, qui croît avec l'intensité du courant, peut être très-faible et produire des effets inappréciables. Pour en accroître l'étendue, replions notre conducteur comme l'indique la figure, et plaçons notre

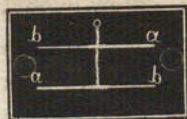
Fig. 167.



aiguille au centre du rectangle ainsi formé. Chaque portion de ce rectangle agira sur l'aiguille et toujours dans le même sens. Cela ne suffit-il point? replions notre fil un plus grand nombre

de fois sur lui-même en l'enroulant sur un cadre en bois ou en cuivre. Chaque tour du conducteur ajoutera son action à celle du tour voisin, et l'effet pourra être centuplé au besoin ou même agrandi dans une proportion beaucoup plus forte. Nous aurons alors un galvanomètre multiplicateur. Enfin, si nous voulons accroître encore davantage la sensibilité de cet appareil, nous nous servirons de deux aiguilles aimantées, de forces à peu près égales, réunies parallèlement l'une à l'autre, et

Fig. 168.

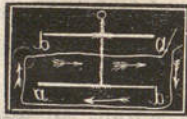


disposées d'une manière inverse. Comme la terre tend à diriger ces deux aiguilles dans des sens contraires, et qu'elles sont dépendantes l'une de l'autre, la force

Galvanomètre.
multiplicateur.Aiguilles
astatiques.

directrice du système est seulement égale à la différence de celle des deux aiguilles isolées, et peut conséquemment être affaiblie autant qu'on le veut.

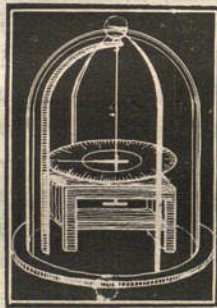
Fig. 169.



Le système des deux aiguilles étant disposé dans le circuit, comme l'indique la figure, il est facile de s'assurer que les actions du courant sur chacune d'elles s'ajoutent au contraire. Il y a donc multiplication considérable de la force motrice, et diminution indéfinie de la résistance au déplacement. Le galvanomètre ainsi construit peut être d'une sensibilité extrême.

Afin que le courant parcoure successivement toutes les circonvolutions du fil, et qu'il y ait bien multipli-

Fig. 170.



cation de la force motrice, ce fil est entouré, dans toute sa longueur, d'un corps mauvais conducteur, de de soie, qui, séparant les spires, les isole suffisamment l'une de l'autre. Le galvanomètre renfermé dans sa cage en verre est représenté dans notre figure. Un cercle gradué placé au-dessous de l'aiguille supérieure, sert à accuser les déviations de cette

aiguille et à les mesurer.

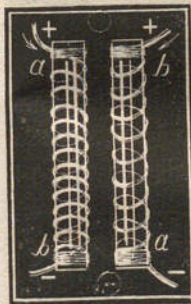
276. Le courant n'agit pas directement sur l'acier des aiguilles, mais sur les forces magnétiques qui y sont développées : la force coercitive transporte l'effet au métal lui-même. Il n'en est plus ainsi quand un courant agit sur un morceau de fer bien pur et non écroui. Là, la mobilité des forces est à peu près complète; aussi est-ce sur elles seulement que l'action s'exerce. Présentons à notre fil traversé par un courant un morceau de fer doux dans une position quelconque, immédiatement nous verrons

Aimantation
du fer doux
par les courants.

celui-ci donner des signes d'aimantation; deux pôles s'y formeront : le *pôle austral à gauche* du courant, le *pôle boréal à droite*. Cet effet durera autant que le courant; il cessera avec lui. Plongeons notre fil dans de la limaille de fer, celle-ci s'y attachera et formera à sa surface des anneaux circulaires dont le plan, perpendiculaire au fil, sera déterminé par cette aimantation transversale. La limaille tombera dès que le courant sera interrompu.

Un effet analogue est présenté avec l'acier ou le fer écoré; mais il est durable et l'aimantation persiste. Le phénomène, dans ce cas, sera peu marqué à moins que l'on ne se serve d'une aiguille courte placée très-près

Fig. 171.



du courant, et que ce courant lui-même ne soit très-énergique; mais nous pouvons l'accroître aisément. Prenons un tube de verre d'un petit diamètre et de la longueur d'une aiguille à tricoter, entourons-le d'un fil de cuivre dans toute son étendue, comme l'indique la figure, introduisons-y une aiguille d'acier, faisons passer le courant pendant un instant même très-court, et retirons l'aiguille: elle sera fortement aimantée. La force coercitive vaincue maintiendra l'effet produit. Le courant marchant dans le même sens aimantera l'aiguille d'une manière inverse, suivant que cette aiguille sera introduite dans l'une et l'autre des deux hélices, parce que la direction des spires s'y trouve elle-même renversée. Le passage de l'étincelle d'une batterie électrique au travers du fil de l'hélice produirait des effets semblables, mais moins marqués. Quelque puissante, en effet, que soit une force, les résultats qu'elle produit dépendent de la durée de son action.

277. On comprend, d'après ce qui précède, tout le parti

Aimantation
de l'acier
par les courants.

Applications
à la formation
des aimants.

que nous pouvons tirer de la pile comme moyen d'aimantation. Aucun procédé ne pourrait développer les forces magnétiques avec autant de promptitude, d'énergie et de régularité que les courants; mais, pour opérer convenablement, il faut employer des fils de cuivre recouverts de soie, les rouler d'une manière régulière autour du barreau d'acier dans toute sa longueur, superposer plusieurs couches de spires, en ayant soin qu'elles marchent toutes dans le même sens, et y faire passer le courant d'une pile assez forte.

CHAPITRE IX.

APPLICATIONS DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

278. On peut avec un courant former des aimants d'une grande puissance dans des barreaux de fer doux, mais la durée de ces électro-aimants est limitée à celle du courant lui-même.

Le plus simple des électro-aimants est représenté *fig. 172*. Il se compose d'une barre de fer doux arrondie

Électro-aimants.

Fig. 172.

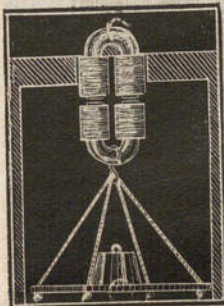


et recourbée en forme de fer-à-cheval, et dont les deux extrémités sont entourées d'un fil de cuivre recouvert de soie. Ce fil, après avoir formé plusieurs centaines de spires, toutes dirigées dans le même sens, sur l'une des extrémités du barreau, est enroulé sur l'autre où il forme un égal nombre de tours dirigés dans le même sens que les circonvolutions qui embrassent la première extrémité. Dès que le courant traverse le fil, une aimantation puissante apparaît dans le barreau; et si nous en approchons un contact en fer bien doux, il nous faudra, pour l'en détacher, employer une force de

plusieurs centaines de kilogrammes si la pile est un peu forte.

L'énergie de l'électro-aimant dépend des dimensions de la barre de fer et de son contact, du nombre de circonvolutions que forme le fil au deux extrémités de la barre, et de l'intensité du courant. En remplaçant le contact par

Fig. 173.



un électro-aimant semblable au premier, mais inversement aimanté, en multipliant suffisamment le nombre des spires, on est parvenu à former un appareil capable de supporter un poids de plusieurs milliers de kilogrammes.

La science et l'industrie ont dû se préoccuper des applications possibles d'une puissance aussi énergique.

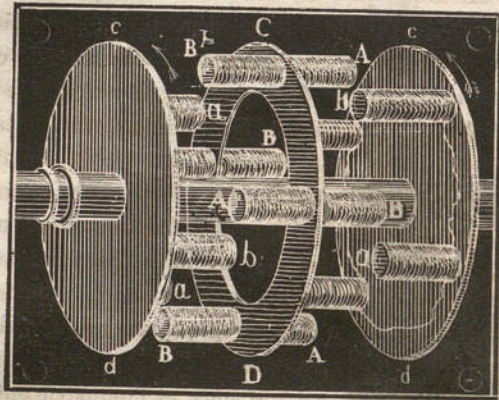
Nous verrons bientôt le rôle qu'elle joue dans les télégraphes électriques; nous dirons d'abord quelques mots des tentatives entreprises dans le but d'employer l'électricité de la pile comme force motrice.

279. Imaginons un grand anneau, *CD* *fig. 174*, sur lequel sont fixées, perpendiculairement à son plan, une nombre pair de tiges de fer bien doux *AB*, au nombre de quatre dans notre figure, et enveloppées par les circonvolutions d'un fil de cuivre couvert de soie dirigées dans un sens pour les tiges d'un ordre pair, et dans le sens contraire pour les tiges d'un ordre impair. Au moment où le courant traversera le fil, toutes ces tiges seront aimantées comme l'indique notre figure : le pôle austral en *A*, le pôle boréal en *B*. Disposons maintenant de chaque côté de notre anneau deux plateaux d'un diamètre égal à celui de cet anneau, sur chacun desquels nous aurons fixé quatre tiges de fer doux réunies deux à deux par des lames de fer, et que nous

Machines
électro-
magnétiques.

ferons porter par un même axe mobile au centre de l'anneau;

Fig. 174.

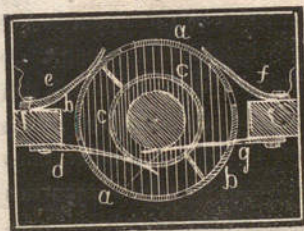


enfin, enroulons autour de toutes ces tiges un même fil de cuivre recouvert de soie, de telle sorte que, pour chaque plateau comme pour chaque anneau, les spires soient dirigées, dans un sens, sur les tiges d'ordre pair, et, dans l'autre, sur les tiges d'ordre impair. Si cette opération a été bien faite, un courant traversant successivement les deux fils, tous les barreaux seront aimantés comme l'indique la figure. Dans cet état, les pôles de noms contraires aB et bA s'attireront, et cette action sera aidée par la répulsion des pôles de même nom bB aA ; et comme l'anneau est fixe, les deux plateaux tourneront dans le sens de la flèche. Au moment où toutes les tiges sont en regard, la force motrice devient sans effet; si elles dépassent cette position, c'est en vertu de la vitesse acquise, et elles tendent alors à rétrograder vers elle. A ce moment, changeons la direction des courants dans les tiges implantées sur les plateaux; la force motrice changera de sens, et, sous son influence, les plateaux continueront à se mouvoir dans la direction primitive.

280. Le renversement des courants peut s'effectuer, du reste, facilement par la machine elle-même, au moyen de la disposition suivante. En l'un des points de l'axe métallique qui réunit les deux plateaux, est disposé un

Renversement
des courants.

Fig. 175.



cercle en bois verni sur lequel sont appliquées quatre bandes *aabb* en cuivre dont la réunion forme une circonférence interrompue en quatre points également distants. Nous donnons de cette roue une vue de face, *fig. 175* ; deux des

lames *aa* sont mises en communication avec l'axe des plateaux ; les deux autres en sont isolées. A côté de cette roue s'en trouve une autre formée par une circonférence métallique complète, isolée de l'axe des plateaux, et communiquant avec les deux segments *bb*. Le pôle positif d'une pile est mis en communication avec l'un des bouts du fil qui arme les barreaux de l'anneau ; l'autre extrémité de ce fil communique avec un ressort *d* qui presse sur la circonférence métallique *c* ; deux autres ressorts *e, f*, pressent symétriquement sur deux des lames contiguës *a* et *b*, et communiquent avec les deux extrémités du fil qui arme les barreaux des plateaux ; enfin, un quatrième ressort *g* appuie contre l'axe des plateaux lui-même, et est mis en relation avec le pôle négatif de la pile. Dans la disposition de notre figure, le courant, après avoir aimanté les barreaux de l'anneau, arrive par *d*, passe de là sur les lames *bb*, pénètre par le ressort *e* dans le fil des plateaux, revient en *a* par le ressort *f*, puis dans l'axe des roues, puis par le ressort *g* dans la pile ; mais si l'appareil exécute un quart de révolution, *e* passera de *b* en *a*, *f* de *a* en *b*. Le sens du courant sera donc

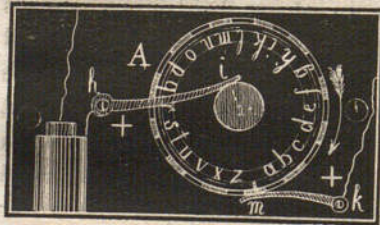
interverti dans les plateaux, et il en arrivera ainsi à chaque quart de révolution. Cette machine fonctionne avec une grande régularité, et a, sur les machines à vapeur ordinaires, l'avantage que la force agit directement sur l'arbre qui doit être mis en mouvement. Espérons que les machines électro-motrices feront assez de progrès pour lutter un jour avantageusement avec les machines à vapeur.

Télégraphes
électriques.

Télégraphe
à cadran.

281. Le problème de la transmission de la pensée à des distances considérables, avec la rapidité de la parole, a déjà trouvé une admirable solution dans l'emploi des télégraphes électriques. La construction de ces appareils a reçu des modifications nombreuses et importantes; nous nous contenterons de faire connaître le plus facile à faire comprendre, le *télégraphe à cadran*. Nos *fig. 176* et *177* représentent la station qui envoie la dépêche et celle qui la reçoit. Deux conducteurs allant de la première à la seconde communiquent entre eux d'une manière permanente. A la station de départ, leurs deux extrémités libres sont mises en relation, l'une avec l'un des pôles, le pôle négatif d'une pile dont nous avons dessiné un

Fig. 176.

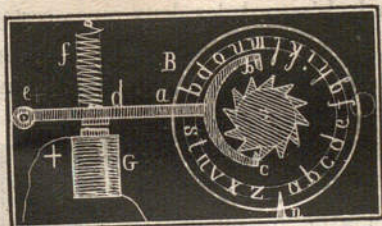


Station
de départ.

seul élément, l'autre avec un ressort *k m* qui appuie constamment sur la circonférence d'une roue *A*. Cette roue métallique porte sur son pourtour douze dents remplies avec de l'ivoire, substance mauvais conducteur des courants de la pile; le tout a été travaillé de telle sorte que la circonférence de la roue soit bien unie. Au centre de cette roue est placé un cylindre métallique *i* sur lequel appuie un ressort *hi* mis en communication avec le pôle

positif de la pile. Dans la position représentée par notre figure, le circuit est interrompu par la lame d'ivoire *m*, et le courant ne passe pas ; mais si on tourne la roue d'une division, le courant passera ; en faisant donc faire à cet appareil une rotation complète, le courant sera établi douze fois, et interrompu douze fois. Chacun des intervalles, métalliques ou non, porte pour signe une des vingt-trois lettres de l'alphabet, l'y ne comptant pas, à l'exception du vingt-quatrième appelé *signe final*, et qui est non conducteur.

Fig. 177.



A la station d'arrivée se trouve une autre roue portant également sur son pourtour les vingt-trois mêmes lettres de l'alphabet rangées dans le même ordre ; le vingt-quatrième espace est en blanc et porte aussi le nom de signe final. Au centre de cette roue s'en trouve une autre qui est dentée comme les roues d'échappement des horloges, et un véritable échappement *eda* en règle la marche. Cet échappement, mobile autour du point fixe *e*, est soulevé par le ressort *f*, mais il porte en *d* une pièce de fer doux. Au-dessous et à une petite distance de ce contact se trouve placée une des extrémités d'un électro-aimant *G* autour duquel est enroulée une portion du conducteur métallique. Quand le courant passe, l'électro-aimant attire le fer doux, la fourchette descend ; quand le courant cesse, la fourchette remonte tirée par le ressort, et, pendant ces oscillations, la roue dentée, sollicitée par un poids ou par un ressort, marche d'une demi-dent ou d'un signe à la fois, ainsi que nous l'avons expliqué § 59 : dans sa course,

Station d'arrivée.

elle fait passer les divers signes de l'alphabet devant un repère B. Nous supposons que nos deux roues soient au signe final; tournons la roue A, la roue B marchera et suivra exactement dans ses mouvements ceux de la roue A. Voulons-nous transmettre le mot Paris, par exemple, nous tournerons la roue A toujours dans le sens de la flèche, jusqu'à ce que la lettre P vienne en regard du repère *m*, et nous la laisserons dans cette position $\frac{1}{5}$ de seconde. La lettre P de la roue B viendra en regard du repère *n*, et y restera $\frac{1}{5}$ de seconde. Nous amènerons ainsi successivement les lettres A R I S devant le repère, et, à la fin du mot, nous reviendrons au signe final. L'accord des deux roues reste toujours parfait, quelle que soit la distance qui les sépare, car l'électricité parcourt une centaine de mille lieues par seconde.

Le télégraphe électrique permet de transmettre ainsi jusqu'à trois signes par seconde. Il en existe d'autres qui sont bien autrement rapides, et qui peuvent exécuter jusqu'à dix, douze ou quinze signes par seconde. Leur complication plus grande nous interdit d'en parler ici. Ce qui précède suffira pour nous faire comprendre toute l'importance de cette découverte. Certains télégraphes impriment eux-mêmes la dépêche à l'arrivée.

282. Les deux conducteurs métalliques ne sont pas indispensables; l'un d'eux peut être remplacé par le sol avec avantage. Aussi ne voit-on qu'un fil tendu horizontalement à quelques mètres du sol, sur les chemins de fer le long desquels ont été établis des télégraphes. Ce fil est en cuivre de 4 mm, ou en fer de 5 à 6 mm de diamètre. Il doit être isolé avec soin dans toute son étendue pour éviter les pertes d'électricité; son extrémité, à la station d'arrivée, plonge dans l'eau d'un puits; il en est de même du pôle négatif de la pile à la station de départ.

CHAPITRE X.

PRODUCTION DES COURANTS PAR LES AIMANTS.

283. La réciprocité des actions physiques nous doit faire penser que les courants dirigeant et formant même des aimants, les aimants à leur tour doivent pouvoir diriger et créer des courants. C'est ce qui arrive en effet.

Toutes les fois qu'un aimant est situé à une distance fixe d'un conducteur métallique formant un circuit fermé, et que son intensité reste constante, aucun effet n'est produit; mais si nous faisons *varier son intensité ou sa distance* au conducteur, celui-ci est à ce

Fig. 178.



moment traversé par un courant électrique. Voici comment nous nous en assurons. Prenons une bobine percée en son centre d'une ouverture cylindrique assez large et recouverte d'un fil qui l'entoure un grand nombre de fois; mettons les deux extrémités de ce fil en communication avec les deux extrémités du fil d'un galvanomètre multiplicateur, puis introduisons rapidement un fort barreau au milieu de la bobine. L'ai-

guille du galvanomètre sera vivement chassée de sa position; mais elle y reviendra aussitôt, et ne conservera plus qu'un mouvement d'oscillation autour de sa position d'équilibre. Dès qu'elle est revenue au repos, retirons brusquement l'aimant; nouvelle déviation passagère de l'aiguille, mais cette fois déviation en sens contraire de la précédente. En examinant attentivement la nature de ce phénomène, on reconnaît que le premier courant est d'une *direction contraire* à celle du courant qui aimanterait un

Courants induits
par les aimants.

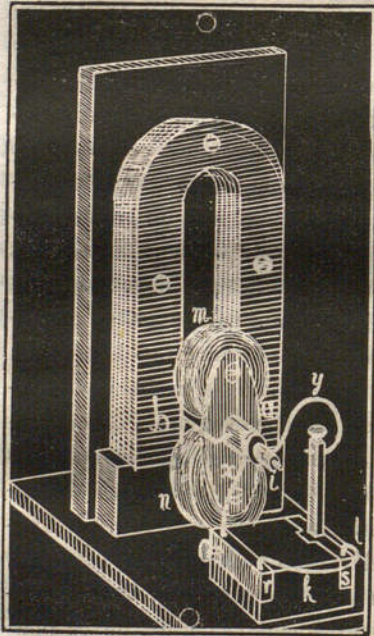
Courant inverse.
Courant direct.

barreau dans le même sens que l'aimant employé : on l'appelle *courant inverse*; le second est dit *courant direct*. Ce phénomène peut être reproduit d'une autre manière. Introduisons dans notre bobine un morceau de fer doux ou un faisceau de fils de fer doux, puis approchons brusquement un aimant de l'un des bouts de ce faisceau; celui-ci s'aimantera par influence et donnera lieu à un courant inverse. Éloignons l'aimant, l'aimantation du fer doux disparaîtra, et nous aurons un courant direct passager comme les précédents.

Propriétés
des courants
induits.

284. Ces courants, appelés *courants induits*, peuvent

Fig. 179.



Machine
de Clarke.

reproduire tous les phénomènes qui sont dus aux courants ordinaires, et plusieurs des machines que l'on a construites pour leur donner naissance d'une manière régulière et facile, ont une grande puissance. Nous avons représenté la plus simple, la machine de Clarke, *fig. 179*.

285. Un fort aimant fixe en fer-à-cheval, est disposé verticalement sur un support; en avant et à une petite distance est un électro-aimant *mn* mobile autour d'un axe horizontal, et mis en mouvement à l'aide d'une roue que nous avons supprimée. Le fil enveloppant communique, par une

de ses extrémités, avec l'axe métallique de l'électro-aimant, et par l'autre avec une petite virole de cuivre isolée, par un anneau d'ivoire, du même axe qui la supporte. Enfin, l'appareil est complété par un support *k* garni latéralement de deux lames de cuivre *s r* isolées l'une de l'autre. L'une de ces lames est garnie d'une tige et d'un ressort *y* qui, appuyant sur l'axe métallique de l'électro-aimant, communique par ce moyen avec l'un des bouts du fil, tandis que l'autre lame est mise en relation avec l'autre bout à l'aide d'un second ressort *x* qui presse contre la virole.

Supposons l'électro-aimant vertical, comme le représente la figure, et faisons-le tourner d'un quart de révolution, de manière à le mettre horizontal; pendant ce mouvement, le fer doux, s'approchant des pôles de l'aimant, s'aimantera par influence; un courant inverse s'établira dans le fil, et produira des effets variables suivant la nature des conducteurs qui relieront les deux plaques métalliques *s r*. Continuons la rotation; pendant le second quart de cercle que nous ferons décrire aux deux pôles de l'électro-aimant, ces pôles s'éloigneront des deux pôles de l'aimant; un courant direct aura donc lieu. Un courant inverse sera encore produit pendant le troisième quart de révolution; mais comme la nature des pôles a changé, l'une des extrémités du fer doux allant du pôle austral au pôle boréal de l'aimant, ce troisième courant sera de même sens que le second. De même, le courant produit dans le dernier quart de révolution sera de même sens que le premier. Chaque révolution complète nous fournira donc en définitive deux courants induits de sens contraires.

286. Fixons sur nos deux lames *s* et *r* deux fils métalliques terminés par des cylindres, que nous tiendrons dans nos mains préalablement mouillées avec de l'eau acidulée, et faisons mettre l'appareil en mouvement; nous

Effets
physiologiques
des courants
électro-
magnétiques.

éprouverons une série de commotions qui deviennent insupportables quand le mouvement est assez rapide.

Fig. 180.



Effets
chimiques.

287. Faisons communiquer ces mêmes lames avec les deux fils d'un petit voltaïmètre, *fig. 180*, l'eau sera décomposée. Seulement ici, comme le courant passe alternativement dans un sens et dans l'autre, chaque éprouvette contiendra le même volume du mélange hydrogène 2, oxygène 1. Mais si nous disposons sur l'axe de l'électro-aimant un commutateur analogue à celui que nous avons décrit, § 280, le courant, conservant une direction constante dans le voltaïmètre, y transportera les gaz dans une direction également constante.

Fig. 181.



Effets
calorifiques.

288. Faisons-nous, au contraire, circuler les courants induits dans un fil métallique très-fin et très-court de platine ou de fer? l'incandescence ou la fusion du fil aura lieu.

Fig. 182.



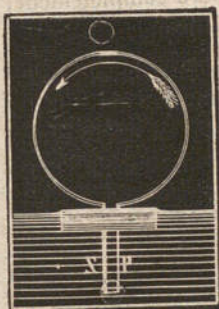
Effets lumineux.

289. Enfin, plaçons à l'extrémité de l'axe de l'électro-aimant un anneau garni de deux pointes, et disposons à une distance convenable au-dessous une petite coupe remplie de mercure ou d'éther. Dans le mouvement de rotation de l'appareil, les pointes, venant successivement plonger dans le liquide, établiront ainsi la continuité du circuit, et livreront passage au courant. A chaque interruption de celui-ci coïncidant avec l'émersion des pointes, une étincelle aura lieu; très-brillante avec le mercure, cette étincelle sera plus faible avec l'éther, mais elle enflammera ce liquide.

Direction
des courants
par les aimants.

290. La direction et l'attraction des courants par les aimants s'effectue d'une manière très-simple et très-nette à l'aide de l'appareil suivant : nous prenons une petite

Fig. 183.



lame d'argent platiné préparée comme nous l'indiquerons plus loin, et une petite lame de zinc amalgamé à sa surface. Nous fixons ces deux lames aux deux extrémités d'un fil de cuivre, et les implantons dans une lame de liège, comme l'indique notre figure. Si nous plaçons ce petit appareil dans un vase contenant une dissolution de 1 partie d'acide sulfurique dans 8 ou 10 parties d'eau, un fort courant s'établira du platine au zinc dans le cuivre. Présentons alors à la partie supérieure et horizontale du circuit un aimant parallèlement à ce courant; immédiatement celui-ci se mettra à tourner sur lui-même pour se mettre en croix avec l'aimant, le pôle austral à sa gauche. Le déplacement est inverse si l'aimant est au-dessous du courant au lieu d'être au-dessus.

Approchons du centre du cercle parcouru par notre courant un aimant horizontal, perpendiculairement au plan du circuit métallique; suivant que le pôle austral sera à gauche ou à droite du courant, l'appareil sera attiré ou repoussé par l'aimant.

Attraction
et répulsion
des courants
par les aimants.

Fig. 184.



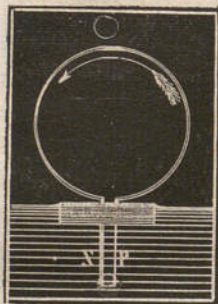
Ces expériences peuvent être répétées avec la table électro-dynamique d'Ampère, dont nous donnons la description dans le chapitre suivant. Mais c'est surtout sur l'arc lumineux qui apparaît entre les deux pointes de charbon, § 269, que le phénomène est bien manifeste. Un barreau aimanté agit sur lui à une grande distance; il l'infléchit visiblement dans un sens ou dans l'autre, suivant la direction du courant et la nature du pôle qui agit sur lui. Son action

même peut être assez forte pour l'éteindre complètement, comme le souffle éteint la flamme d'une bougie.

Direction
des courants
par la terre.

291. La terre agissant sur les substances magnétiques comme le font les aimants, devra, comme ceux-ci, diriger

Fig. 185.

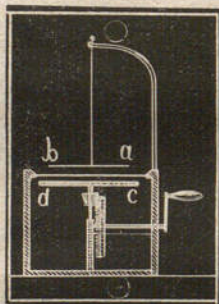


les courants. C'est, en effet, ce qui arrive. Ainsi, abandonnons notre appareil à la seule action des forces terrestres, il se dirigera constamment dans un plan perpendiculaire au plan du méridien magnétique, et de telle manière que le courant aille de l'est à l'ouest dans la partie inférieure du circuit, et de l'ouest à l'est dans la partie supérieure.

292. Nous dirons, en terminant, quelques mots d'un phénomène intéressant, découvert par M. Arago. Suspendons une aiguille aimantée au-dessus d'un disque de cuivre auquel nous imprimerons un mouvement de rotation rapide.

Fig. 186.

Magnétisme
en mouvement.



Des courants induits se produiront dans le cuivre sous l'influence de l'aimant, et, agissant à leur tour sur cet aimant, ils lui imprimeront à lui-même un mouvement de rotation

dans le même sens.

CHAPITRE XI.

ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

293. Tous les phénomènes produits par les aimants peuvent également l'être par les courants.

Enroulons simultanément sur une même bobine deux longs fils de cuivre recouverts de soie; mettons les deux extrémités de l'un de ces conducteurs en communication avec les deux bouts du fil d'un galvanomètre, et les deux extrémités de l'autre en communication avec les deux pôles d'une pile. *Au moment* où le courant de la pile traversera l'un des fils, l'aiguille du galvanomètre sera déviée et accusera dans l'autre un *courant induit inverse* du courant inducteur. Le courant induit est instantané; l'aiguille déviée revient au repos, et y reste tant que dure le courant inducteur. Mais dès que celui-ci cesse, un nouveau courant induit apparaît, *direct* cette fois.

Courants induits
par les courants.

Si nos deux fils, au lieu d'être enroulés simultanément, étaient enroulés en spirales planes sur deux planches distinctes, et si, faisant passer un courant dans l'une d'elles, nous en approchions brusquement l'autre pour l'en éloigner ensuite brusquement aussi, nous aurions encore deux courants induits : un courant inverse pendant le rapprochement, un courant direct pendant l'écartement. Tant que la distance des deux fils reste constante, aucun effet n'est produit.

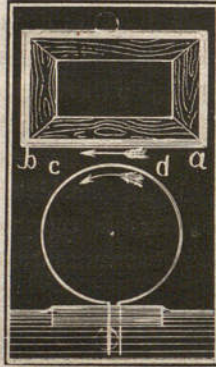
294. L'action inductrice d'un courant peut s'exercer sur le circuit même qu'il parcourt. Un courant jouit de propriétés différentes suivant que le fil qu'il traverse est étendu ou lâchement replié, ou bien qu'il est tordu en spires rapprochées et superposées. Si on vient à interrompre le circuit en tenant entre les doigts mouillés les deux bouts que l'on vient de séparer, dans le premier cas on éprouve une secousse faible, à moins que la pile ne soit très-énergique; dans le second cas, l'effet peut être violent. La commotion est bien plus forte encore si un barreau de fer doux est enveloppé par les circonvolutions du fil, et il serait souvent très-dangereux de s'y exposer.

Courants induits
par eux-mêmes.

Attraction,
répulsion
et direction
des courants
par les courants.

295. Tous les phénomènes de direction peuvent être reproduits avec notre petit appareil. Pour leur donner plus

Fig. 187.



d'énergie, nous emploierons un multiplicateur composé d'un cadre en bois sur lequel nous avons enroulé une lame de cuivre recouverte d'un ruban de soie. Le courant traversant successivement toutes les spires, produit des effets dont l'intensité est à peu près multipliée par le nombre des circonvolutions. Présentons cet appareil, la partie *ab* horizontalement au-dessus de notre courant, comme l'indique la *fig. 187*. Si les deux cou-

rants *ab* et *cd* ne sont pas dans le même plan, le conducteur mobile tournera sur lui-même et viendra se placer parallèlement au-dessous de *ab*, de manière que les courants en regard *ab* et *cd* soient dirigés dans le même sens. Dans cette position, ils s'attirent; et si on avance doucement *ab* parallèlement à lui-même, *cd* sera entraîné par cette force d'attraction. Si nous disposions nos deux courants parallèlement entre eux, mais de manière à ce qu'ils fussent dirigés de sens inverses, ils se repousseraient au contraire; le courant mobile s'éloignerait, mais en même temps il tournerait sur lui-même pour se disposer parallèlement et de même sens. Ces expériences peuvent être répétées plus en grand avec la table plus compliquée d'Ampère. Nous avons préféré décrire des instruments que chacun peut lui-même construire, et qui suffisent d'ailleurs.

Lois des actions
des courants
sur les courants.

296. Tous les phénomènes de direction et d'attraction ou de répulsion des courants par les courants, peuvent se résumer dans les formules suivantes :

1^o Deux courants parallèles s'attirent quand ils sont

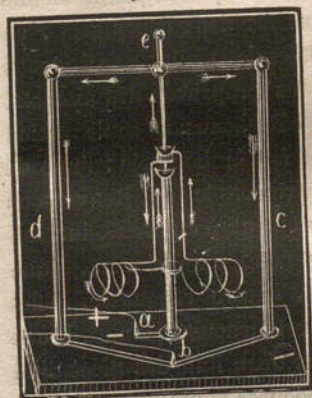
dirigés de même sens, se repoussent quand ils sont dirigés de sens contraires;

2^o Deux courants angulaires s'attirent quand tous deux s'approchent ou s'éloignent du sommet de l'angle, se repoussent quand l'un s'approche du sommet de l'angle et que l'autre s'en éloigne;

3^o Nous ajouterons que deux portions contiguës d'un même courant se repoussent.

297. Ces trois lois peuvent rendre compte de tous les phénomènes produits par les courants, et, entre autres,

Fig. 188.



des propriétés des solénoïdes, appareils construits par Ampère, et qui présentent des analogies remarquables avec les aimants.

Solénoïdes.

La table d'Ampère est indispensable pour l'étude des solénoïdes. Celle dont nous nous servons se compose simplement de trois colonnes en cuivre *cdg* plantées sur une table vernie. Les deux colonnes *cd* sont réunies supérieurement

Table d'Ampère.

par une traverse en cuivre dans laquelle se meut à frottement doux une tige *e* terminée en pointe. Ces deux colonnes sont réunies inférieurement par deux lames de cuivre clouées sur la table vernie *mn*, et surmontées d'un petit cône en laiton *b*. La troisième colonne, terminée supérieurement par un godet *g* garni à l'intérieur d'une petite coupelle de verre, communique inférieurement avec un second cône *a*.

Notre solénoïde est formé d'un fil de cuivre fin recouvert de soie, contourné en deux spirales séparées l'une de l'autre par un anneau léger en corne sur lequel est

attaché le fil qui relie les deux spirales. Les deux bouts de ce fil se relèvent verticalement; l'un d'eux est soudé à un petit disque de cuivre portant en son centre une pointe d'aiguille en acier; sur ce disque est mastiquée une petite coupelle de cuivre à laquelle est soudé l'autre bout du fil du solénoïde. Passons la tige *g* au travers de l'anneau de corne, et faisons appuyer la pointe d'aiguille sur la coupelle *g* préalablement remplie de mercure: la plus faible force suffira pour mouvoir notre solénoïde autour de son point d'appui; remplissons alors sa coupelle de mercure, et faisons descendre la tige *e* de manière que sa pointe vienne toucher ce liquide, puis mettons les deux cônes *a* et *b* en communication avec les deux pôles de la pile; nous aurons un appareil qui jouira de toutes les propriétés des aimants.

Propriétés
des solénoïdes.

Cet appareil se dirigera, en effet, sous la seule action des forces terrestres, comme le fait la boussole: l'une de ses extrémités vers le nord, l'autre vers le sud. Renversons le courant, et l'appareil tournera bout pour bout sur lui-même. Présentons-lui l'un des pôles d'un aimant, l'une de ses extrémités sera attirée, l'autre repoussée. Effet semblable, mais inverse si nous retournons l'aimant. L'une des extrémités du solénoïde attire donc l'un des pôles d'un aimant, ou est attiré par lui et repousse l'autre. Remplaçons notre aimant par un solénoïde semblable au premier, et les mêmes résultats seront produits. Les solénoïdes, comme les aimants, présentent donc deux pôles doués de propriétés contraires; deux pôles semblables de deux solénoïdes se repoussent, deux pôles de noms contraires s'attirent.

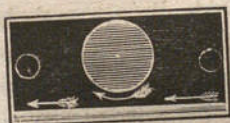
Théorie
électrique
du magnétisme.

298. Cette analogie a conduit Ampère à rattacher les propriétés des aimants et des solénoïdes à la même cause: de là la théorie électrique des aimants. Dans cette théorie, un aimant devrait ses propriétés à des courants électriques circulant autour des particules même du métal: ces

courants existeraient également dans toutes les substances magnétiques, et notamment dans le fer doux, mais dirigés dans tous les sens; l'aimantation les orienterait et les ramènerait plus ou moins complètement dans un même plan. Un aimant serait donc formé d'une infinité de petits solénoïdes plus ou moins régulièrement groupés suivant son degré d'énergie.

La terre devrait également ses propriétés magnétiques à un courant électrique circulant vers les régions équatoriales, de l'est à l'ouest dans le sens du soleil. Dans une

Fig. 189.



boussole située dans le méridien, les courants élémentaires seraient par conséquent dirigés dans le même sens à la partie inférieure, et de l'ouest à l'est dans la partie supérieure.

Courant terrestre.

CHAPITRE XII.

MESURE DES COURANTS.

299. L'énergie des effets produits par un courant électrique ou voltaïque dépend de circonstances nombreuses qu'il nous importe de connaître, afin de fixer les conditions les plus favorables à la production des phénomènes que nous désirons obtenir.

Nous examinerons d'abord les moyens mis en usage pour comparer les courants. Ces moyens sont fondés sur les propriétés chimiques, magnétiques et thermiques de ces courants.

300. Toutes les fois qu'un courant traverse de l'eau acidulée, son passage y est marqué par la décomposition d'une partie de la masse liquide, § 265. Existe-t-il un rapport simple entre l'intensité du courant et la quantité des gaz

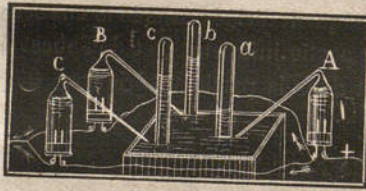
Proportionnalité
entre la quantité
d'électricité
qui circule et

1^o la force
chimique
du courant.

qu'il produit pendant l'unité des temps? oui, l'expérience le démontre.

Prenons un tube de verre de deux centimètres de diamètre intérieur et de trois à quatre centimètres de longueur; étirons-le à l'un de ses bouts en une pointe longue et recourbée, comme on le voit dans la figure; fermons l'autre extrémité avec un bouchon traversé par deux fils de platine, et, après avoir rempli l'appareil d'un mélange formé de 10 parties d'eau et de 1 partie d'acide sulfurique, faisons-y passer un courant jusqu'à ce que les gaz produits pendant la décomposition de l'eau aient exactement saturé la masse

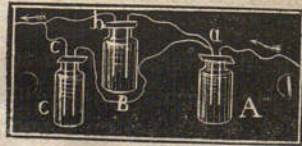
Fig. 190.



liquide. Préparons de la même manière deux autres voltaïmètres semblables. Cela fait, engageons la pointe de chaque voltaïmètre sous une petite cloche graduée remplie de mercure et renversée sur une petite cuve à mercure, et faisons passer le courant d'une pile d'abord dans le premier voltaïmètre *a*, puis *simultanément* dans les deux autres *b* et *c*. Au bout d'un temps quelconque, si nous mesurons les quantités des gaz produits, nous en trouverons en *a* précisément *autant* qu'en *b* et *c* réunies, et cela a lieu quelle que soit la puissance chimique du courant employé.

Opérons autrement: prenons deux lames de cuivre bien décapées, pesons-les, plantons-les parallèlement dans un

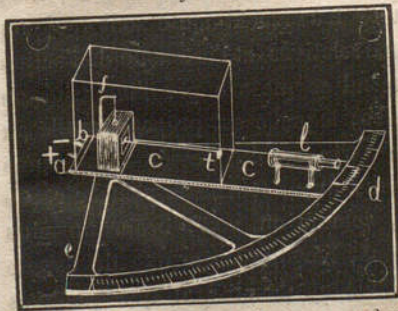
Fig. 191.



bouchon de liège, et plongeons-les dans une dissolution de sulfate de cuivre dans l'eau; préparons deux autres appareils semblables, puis faisons passer un courant, d'abord au travers de la dissolution A,

puis simultanément au travers des dissolutions B et C; du cuivre métallique se déposera sur les lames *a*, *b* et *c*. En les pesant après l'opération pour juger de ce dépôt, nous trouverons, dans quelque circonstance que nous ayons opéré, autant de cuivre réduit sur *a* que sur *b* et *c* réunis. Même résultat en opérant sur des dissolutions d'or, de platine, d'argent..., si nous employons du platine pour former les lames *a b c*. Ainsi donc, la moitié ou le quart d'un courant quelconque produit un effet chimique égal à la moitié ou au quart de l'effet produit dans le même temps par le courant total, et nous pouvons conséquemment prendre pour mesure proportionnelle d'un courant l'effet chimique qu'il produit pendant l'unité de temps: l'heure ou la minute. Ce moyen est incontestablement le meilleur; lui seul peut fournir des mesures partout comparables de l'intensité des courants; mais il n'est pas toujours applicable, et comme il exige que le courant agisse pendant un temps assez long, il entraînerait des pertes de temps considérables.

Fig. 192.



301. L'emploi de la boussole est beaucoup plus général et plus expéditif. La meilleure est la boussole dite *des sinus*. Sa forme est très-variable; voici l'une des plus simples. Un cadre en bois, enveloppé d'un fil de cuivre recouvert de soie, comme dans les galvanomètres ordinaires, § 275, est fixé sur une planche *c* mobile autour du centre d'un cercle ou d'une fraction de cercle gradué *d e*; dans l'intérieur de ce cadre est suspendu, par un fil de soie sans torsion, à un support fixé sur la planche, un petit

2° Sa force magnétique.

Boussole des sinus.

barreau d'acier modérément aimanté, mais fortement trempé afin que ses propriétés magnétiques ne puissent être modifiées par le courant. Ce petit barreau porte horizontalement, et perpendiculairement à sa direction, une petite tige légère *t* munie, à son extrémité, d'un petit disque de papier vertical et sur lequel est tracé un repère en forme de X. Le tout est renfermé dans une cage en verre pour éviter les agitations de l'air. Enfin, une lunette horizontale, portant un fil vertical au foyer de son objectif, sert à suivre les mouvements de l'aiguille *t*, et par suite ceux du barreau. Lorsqu'on veut faire usage de cet instrument, on dirige la planche *c* de manière que le point de croisement du repère X coïncide avec le fil de la lunette, et on lit la division du cercle gradué à laquelle correspond le zéro du vernier fixé à la planche *c*. On fait alors passer le courant au travers du fil galvanométrique dont les deux extrémités viennent aboutir en *b* et *a*; l'aiguille est déviée; alors on tourne la planche jusqu'à ce que le repère vienne de nouveau tomber sous le fil de la lunette. De cette manière, le courant et le barreau aimanté sont toujours dans les mêmes situations relatives, et l'intensité de l'action du premier sur le second se mesure par l'intensité de l'action directrice du globe, laquelle est proportionnelle au sinus de l'angle dont le barreau a été dévié, ou au sinus de l'angle égal dont nous avons tourné la planche *c*. Ce moyen de mesure est, comme on voit, beaucoup plus expéditif que le précédent, l'évaluation exacte de l'angle dont l'aimant a été dévié ne demandant que quelques minutes, et les tables de logarithmes fournissant la valeur du sinus d'un angle quelconque. Malheureusement, les indications d'une boussole dépendant essentiellement de sa construction, un même courant déviéra inégalement les aimants de deux boussoles différentes. Ce procédé ne

fournit donc point des résultats comparables, et c'est là la source principale du chaos au milieu duquel est plongée l'électricité voltaïque. La boussole est comme un thermomètre dont on n'aurait pas pris les points fixes. Ce très-grave inconvénient peut être facilement évité.

302. L'expérience a démontré, en effet, que l'action magnétique d'un courant est exactement proportionnelle à son action chimique; il suffit donc de faire passer simultanément, au travers d'une boussole des sinus et d'un voltamètre, un courant maintenu constant pendant toute la durée de l'expérience, et, au bout de quelques heures, de comparer la déviation constante de la boussole avec l'effet chimique produit pendant l'unité de temps. Soit A la quantité de cuivre réduit pendant une heure par un courant produisant sur la boussole une déviation de 15° . Un courant qui produirait sur la même boussole une déviation quelconque x , aurait une intensité chimique y fournie par la proportion $y:A :: \sin x : \sin 15$. De cette manière, et si on a la précaution de vérifier de temps en temps la graduation de sa boussole, on peut avoir pleine confiance dans les résultats qu'elle fournit. Dans toute expérience de précision, on doit rejeter absolument l'emploi des aiguilles astatiques décrites § 275, leurs indications étant trop variables, trop incertaines. Si le courant que nous voulons mesurer est trop faible, augmentons la précision des lectures, mais n'employons qu'une aiguille.

303. Plusieurs observateurs ont mesuré l'intensité des courants auxquels ils donnaient naissance dans des circonstances variables par la quantité de chaleur que ces courants développaient dans une portion déterminée de leur circuit. Considéré d'une manière générale, c'est le plus défectueux des trois procédés employés. L'expérience a démontré, en effet, que la chaleur produite dans ce cas est

Graduation
de la boussole
des sinus.

Aiguille
des sinus
à l'usage
de la boussole
des sinus

30 Sa force
thermique.

bien proportionnelle à l'action chimique ou magnétique du courant qui lui donne naissance, mais seulement dans des conditions déterminées. En effet, la chaleur développée dans un conducteur traversé par un courant dépend de la résistance que ce conducteur oppose au passage du courant. Or, cette résistance variable avec la nature, les dimensions, l'état du conducteur, dépend et de l'intensité du courant et de la somme totale des résistances qu'il surmonte dans le circuit qu'il parcourt, ainsi que nous le verrons dans le chapitre XIII. Il faut donc avoir très-grand soin encore ici, si l'on veut obtenir des résultats vraiment scientifiques, de ramener les mesures thermométriques à l'unité chimique, la seule qui doit être adoptée, parce qu'elle seule est indépendante et des temps et des lieux.

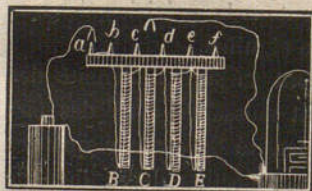
CHAPITRE XIII.

DES LOIS DE LA PILE.

L'intensité
du courant
dépend
des résistances
qu'il doit
surmonter.

304. L'intensité, les propriétés même d'un courant voltaïque ne dépendent pas seulement de l'énergie de la pile qui engendre ce courant. En chaque point du circuit qu'il parcourt, des résistances viennent l'amoinrir ou le modifier.

Fig. 193.

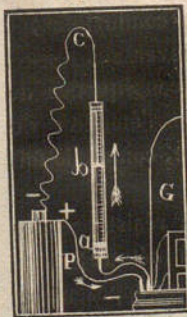


Nous avons enroulé sur un petit tube de verre 10 mètres d'un fil de fer très-fin et d'un fil de soie dont les spires isolaient les spires métalliques; nous avons préparé plusieurs tubes semblables, puis nous avons réuni bout à bout tous les fils, et avons fait communiquer les parties ainsi reliées avec des cônes de cuivre ou d'argent *abcd...* Cet appareil étant

ainsi disposé, nous mettons l'une des extrémités du fil de notre boussole, représentée dans notre figure par un galvanomètre ordinaire, en communication avec le pôle négatif d'une petite pile dont le pôle positif est muni d'un cône creux avec lequel nous recouvrons le cône *a*. La seconde extrémité de notre fil galvanométrique est terminée elle-même par un semblable cône que nous plaçons en *b* ou en *c* ou en *d*... Dans le premier cas, le courant passe directement de *a* en *b*; dans les autres, il est obligé de parcourir toute la spirale B ou bien les spirales B et C... Or, chaque fois que nous introduisons une spirale nouvelle dans le circuit, nous voyons l'aiguille de la boussole se rapprocher du méridien, et accuser conséquemment un affaiblissement correspondant dans l'intensité du courant. La soustraction d'une hélice du circuit amène, au contraire, un accroissement dans l'action magnétique du courant.

La même expérience peut être répétée avec des spirales formées avec d'autres métaux, le cuivre, l'argent, le platine... Nous obtiendrons toujours des résultats analogues.

Fig. 194.



305. Au lieu de spirales métalliques, prenons un tube de verre creux, bien cylindrique et gradué en millimètres; fermons-le à sa partie inférieure par un bouchon surmonté d'un disque de cuivre *a*, et à sa partie supérieure par un second bouchon de liège dans lequel glisse à frottement une tige de cuivre terminée par un second disque de cuivre *b*. Puis, ayant rempli notre tube avec une

dissolution de sulfate de cuivre, attachons l'un des bouts du fil galvanométrique à la tige *a*, l'autre au pôle positif de la pile, et mettons la tige *c* en communication avec le pôle négatif de la même pile. Le courant s'établira dans le circuit

ainsi complété, et traversera la colonne liquide comprise entre les deux disques *a* et *b*. En éloignant donc ou rapprochant ces deux disques, nous allongerons ou raccourcirons le trajet : nous verrons en même temps diminuer ou augmenter la déviation de la boussole. Le même résultat serait produit avec une dissolution quelconque ; seulement il convient alors de remplacer les disques de cuivre par des disques d'un métal approprié à la liqueur employée.

Lois
de résistances
opposées
par les
conducteurs
au passage
du courant.

306. En comparant les résultats obtenus dans ce genre d'expériences que l'on peut varier à l'infini, on reconnaît que la résistance opposée par une portion du circuit au courant qui le traverse, varie avec la longueur de cette portion, avec l'étendue de sa section transversale, avec la nature de la substance dont elle est formée, avec la température même, enfin avec la nature de la pile et avec la composition du reste du circuit.

D'une manière générale, nous pouvons dire que la résistance d'un conducteur varie :

1^o En raison inverse du carré de l'intensité du courant qui le traverse ;

2^o Proportionnellement à la longueur du conducteur ;

3^o En raison inverse de sa section transversale.

Cette dernière proposition n'est qu'une conséquence de la première, le courant occupant toute l'étendue du conducteur, et non pas seulement sa surface, comme le fait l'électricité en repos.

4^o La chaleur diminue ordinairement la résistance des liquides, et accroit, au contraire, celle des métaux ;

5^o Deux conducteurs de natures différentes opposent au passage d'un même courant des résistances très-variables, mais qui restent entre elles dans un même rapport, quelle que soit l'intensité du courant, tant que leur température ne varie pas.

Résistance de quelques métaux réduits en fils de même longueur et de même section.

Mercure.....	100	Cuivre.....	2,63
Fer.....	de 17 à 20	Or pur.....	2,56
Laiton.....	de 15 à 50	Argent fin.....	1,92
Platine.....	11,76	Palladium.....	1,72

Résistance de quelques dissolutions salines ramenées aux mêmes dimensions que les métaux.

Dissolution saturée de sulfate de cuivre....	41000000.
— de sulfate de zinc.....	98000000.
Eau distillée	16400000000.

On voit combien la résistance des liquides l'emporte sur celle des métaux.

307. Les diverses propositions qui précèdent nous conduisent à une formule simple représentant assez exactement la loi des intensités du courant produit par une pile.

De la proposition 5, nous concluons, en effet, que toutes les résistances d'un circuit peuvent être exprimées à l'aide d'une longueur correspondante d'un fil de cuivre, longueur calculée d'après la résistance particulière de la portion du circuit considéré, et en tenant compte des propositions 1, 2, 3, 4. Ces résistances étant ainsi ramenées à une commune mesure, nous pouvons dire que l'intensité d'un courant quelconque varie en raison inverse de la somme totale des résistances qu'il doit surmonter, ce que nous exprimons par la formule

$$i = \frac{A}{L+l}$$

dans laquelle i représente l'intensité du courant, L la résistance évaluée du conducteur interpolaire, l la résistance également évaluée de la pile qui elle-même est

Calcul
des résistances.

Loi de Ohm.

bien toujours traversée par le courant, et enfin A la force électro-motrice supposée constante et indépendante du circuit total.

Limite
du degré
d'exactitude
de la loi
de Ohm.

Résistances
aux surfaces
dissimétriques.

Distinction
entre la force
électro-motrice
d'une pile
et l'intensité
du courant
qu'elle produit.

Cette formule, d'une très-grande importance pour l'intelligence des propriétés de la pile voltaïque, a été trouvée par Ohm à l'aide de considérations trop complexes pour que nous les fassions connaître. De nombreuses expériences ont été entreprises dans le but d'en vérifier l'exactitude; elles ont conduit à ce résultat, que la loi de Ohm n'est pas rigoureusement vraie, parce qu'elle ne tient compte que des résistances des conducteurs homogènes, et non point des obstacles que le courant doit surmonter en passant d'un conducteur à un autre. Tout changement de conducteur amène une diminution dans l'intensité du courant; et comme la loi de ces déperditions de force n'est pas la même que pour les conducteurs homogènes, les résistances aux surfaces dissimétriques ne sauraient être exprimées en longueurs d'un fil de cuivre. Il faudrait donc ajouter un terme à la formule de Ohm pour la rapprocher de la vérité. Heureusement l'influence de ce terme est en général peu considérable, et, dans la plupart des cas, on peut s'en tenir à la loi ci-dessus.

308. En agissant ainsi, nous voyons que, dans toute pile, on doit considérer deux choses essentiellement distinctes : la force *électro-motrice* ou *tension* de la pile qui ne dépend que de la pile et non du circuit, et l'*intensité du courant* qui est modifiée sans cesse avec la composition du circuit. C'est pour avoir négligé la distinction tranchée qui existe entre ces deux éléments, que l'on rencontre tant de confusion dans les écrits de la plupart des électriciens. La force électro-motrice d'une pile est égale à 1000, par exemple, et la résistance totale du circuit que parcourt le courant égale à 100? ce courant aura une in-

tensité égale à 10. Prenons une autre pile dont la force électro-motrice soit égale à 1,000,000 et la résistance totale égale à 100000, l'intensité sera encore égale à 10. Mais ces deux courants, qui ont des intensités égales, seront très-loin de jouir des mêmes propriétés; car si nous les faisons passer au travers d'un voltmètre dont la résistance soit égale à 100, le premier deviendra

$$i = \frac{1000}{100+100} = 5, \text{ et le second}$$

$$i = \frac{1000000}{100000+100} = 9,9.$$

L'un conservera presque toute son intensité, tandis que l'autre en perdra la moitié. L'intensité du courant d'une pile ne suffit donc pas pour apprécier la valeur de celle-ci, si on ne connaît pas en même temps la résistance totale du circuit parcouru.

309. La force électro-motrice d'une pile croît avec le nombre des couples qui la composent. La multiplication de ceux-ci n'est toutefois pas toujours également avantageuse, car la résistance l de la pile croît aussi avec le nombre des couples. Il faut se guider sur la nature des résistances interpolaires que doit vaincre le courant.

Influence
du nombre
des couples.

Nous avons 10 couples semblables dont la force électro-motrice A est égale à 1000 et la résistance l à 100. Nous prenons un seul de ces éléments, nous réunissons ses deux pôles par un mince fil de platine dans lequel nous voulons produire des phénomènes d'incandescence, et dont la résistance L est égale à 1; l'intensité du courant sera

$$i = \frac{1000}{1+100} = 9,9.$$

Nous assemblons nos 10 éléments en une seule pile dont

nous réunissons également les pôles par notre fil de platine. L'intensité sera

$$i = \frac{1000 \times 10}{1 + 100 \times 10} = 10.$$

Influence
de l'étendue
des éléments.

Nous n'aurons donc à peu près rien gagné. Nous aurions avantage, au contraire, à augmenter l'étendue de nos couples pour diminuer la résistance l . Au lieu de notre fil métallique, interposons entre les deux pôles une solution saline à décomposer, dont la résistance soit égale à 10000. Avec un seul couple, l'intensité du courant sera égale à 0,9; avec dix couples, égale à 5, c'est-à-dire plus de 5 fois plus grande.

Bien des faits incompréhensibles au premier abord s'expliquent tout naturellement par les considérations qui précèdent.

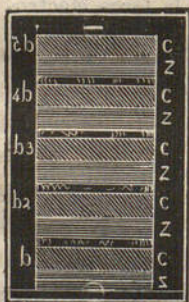
CHAPITRE XIV.

DES PILES ÉLECTRIQUES.

310. L'énergie des piles varie beaucoup suivant leur nature. La pile à colonne, à cause du grand nombre d'éléments dont elle est composée, possède une force électro-motrice considérable; mais la résistance qu'elle oppose au passage du courant affaiblit celui-ci dans une très-forte proportion. Elle peut être montée à peu de frais, et produit des commotions assez fortes, mais elle est d'un emploi très-restreint.

Pile voltaïque.

Fig. 195.



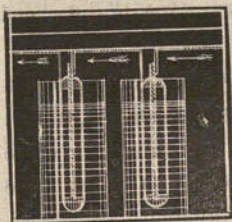
Depuis Volta, les piles ont été modifiées de mille manières; toutes peuvent

être rangées en deux classes : les piles à un seul liquide, et les piles à deux liquides séparés par un diaphragme.

§ I. — Piles à un seul liquide.

311. Une des premières améliorations apportées à la pile

Fig. 196.

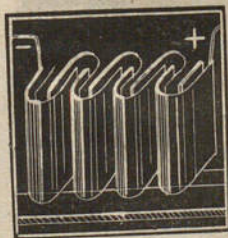


de Volta est due à Wollaston. Nous avons dessiné deux couples de la pile imaginée par cet éminent physicien. Chaque cuivre embrasse, sans le toucher métalliquement, un zinc dont il est séparé par du bois ou du liège. Chacun de ces éléments

Pile de Wollaston.

cuvre et zinc plonge dans un vase de verre contenant de l'eau chargée d'un dixième ou d'un vingtième d'acide sulfurique. Le zinc attaqué par l'acide cède à celui-ci l'électricité positive qui est recueillie par le cuivre correspondant, et nous avons autant de courants superposés et dirigés tous dans le sens de la flèche que nous avons de couples. L'isolement des couples dans un bocal séparé rend la pile de Wollaston d'un usage très-incom-

Fig. 197.



mode, à cause des dimensions énormes qu'elle acquiert dès qu'elle renferme un nombre un peu grand d'éléments. Young, puis ensuite Munch, l'ont considérablement simplifiée.

Pile de Munch.

312. Nous avons dessiné sept des éléments de la pile de Munch. Grâce à l'enchevêtrement des lames zinc et cuivre repliées en deux parties parallèles entre elles, cent éléments d'une semblable pile n'occupent pas plus de cinq ou six décimètres de longueur, et peuvent baigner tous dans la même masse liquide. Rien n'est plus commode que cette pile; ses effets sont énergiques

et assez durables, surtout quand on a pris soin d'amalgamer les zincs.

Causes
de
l'affaiblissement
rapide des piles
de Wollaston
et de Munch.

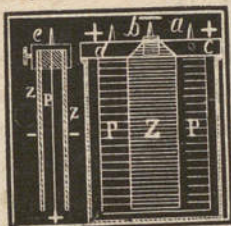
313. Les piles dont nous venons de parler ont un grave inconvénient ; le courant qu'elles engendrent et qui les traverse produit dans leur sein des décompositions de la masse liquide à la surface de chaque lame métallique. L'oxygène produit se porte sur les zincs qui l'absorbent en s'oxydant pour se dissoudre ensuite dans la liqueur ; l'hydrogène, au contraire, apparaît en nature à la surface des cuivres, s'y rassemble sous forme de bulles qui s'en détachent plus ou moins rapidement, s'élèvent au travers de la masse liquide pour venir crever à sa surface. Mais ce dégagement ne se fait pas d'une manière complète, instantanée ; une couche gazeuse plus ou moins épaisse reste adhérente à la surface des cuivres, et, soit qu'elle oppose une résistance considérable au passage du courant, soit qu'elle tende à produire des courants inverses qui amoindrissent le courant primitif et principal, celui-ci décroît rapidement et considérablement en intensité. Bien que ce phénomène soit moins prononcé sur la pile de Munch que sur celle de Wollaston, il est encore très-appreciable et très-nuisible au jeu de l'appareil.

MM. Smée et Sturgeon ont essayé de faire disparaître ou du moins d'amoindrir ce défaut ; ils sont parvenus à former des piles très-puissantes, très-économiques, et qui probablement finiront par devenir d'un emploi général.

Pile de Smée.

314. La pile de Smée se compose d'une large lame P P de platine, d'argent ou de cuivre argenté que l'on a recouverte d'une couche de platine en poudre, et de deux lames de zinc z plus étroites, disposées parallèlement entre elles de chaque côté de la lame platinée, *fig.* 198 et *fig.* 199. La lame platinée est comprise, par son bord supérieur, entre deux lames de bois c d serrées

Fig. 198. 199.

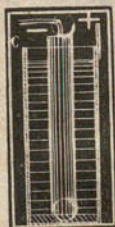


Pile de Smée.

l'une contre l'autre au moyen de la pince *e* qui sert à fixer en même temps les lames de zinc. Cet appareil est plongé dans un vase de verre contenant un mélange de 1 partie d'acide sulfurique et de 7 parties d'eau. Le zinc amalgamé ou recouvert d'une couche de mercure à sa surface est attaqué par l'acide, et s'électrise négativement; l'argent ou le platine platinés recueillent l'électricité positive prise par l'acide. On réunit plusieurs éléments semblables, en ayant soin de faire communiquer les zincs de l'un d'eux avec le platine de l'élément voisin.

315. La pile de Sturgeon est plus simple encore : chaque élément se compose d'un vase cylindrique en

Fig. 200.



Pile de Sturgeon.

fonte, de 250mm de hauteur et de 76mm de diamètre, que l'on remplit d'un liquide composé de 8 parties d'eau et de 1 partie d'acide sulfurique, et dans lequel on fait plonger un cylindre de zinc amalgamé supporté par un petit disque en bois. Le métal platiné, et le fer, surtout quand il a été oxydé, laissent à l'hydrogène un dégagement facile, et font disparaître ainsi l'un des inconvénients les plus graves des piles de Wollaston et de Munch. Le zinc amalgamé présente encore cet avantage qu'il n'est pas sensiblement attaqué par l'acide tant que le circuit n'étant pas fermé le courant ne passe pas; et que, quand celui-ci est établi, la quantité de zinc dissous correspond directement à l'intensité du courant produit. Il n'y a donc point perte de matière, comme dans les piles de Volta, de Wollaston.....

Platine
platiné.

Fer.

Zinc amalgamé.

§ II. — Piles à deux liquides.

Les piles à deux liquides sont dans des conditions encore plus favorables que les précédentes, relativement à la régularité, à la constance des effets produits.

316. Un des éléments d'une pile Daniel est représenté,

Pile de Daniel.

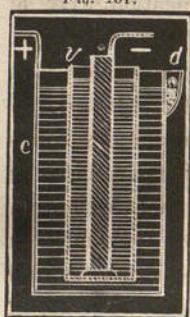


Fig. 201.

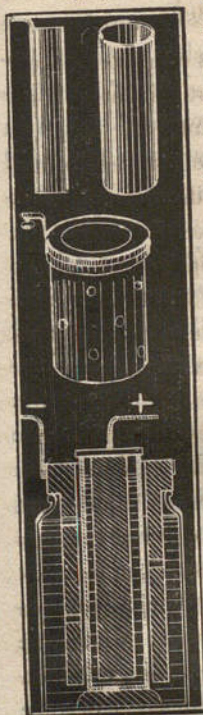
fig. 201. Un cylindre de zinc amalgamé z est placé dans un vase poreux cylindrique en terre de pipe ou en porcelaine dégourdie ou non vitrifiée, et rempli d'une dissolution d'un acide ou d'un sel. Le cylindre poreux v est placé lui-même au centre d'un vase cylindrique en cuivre rempli d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre, et muni latéralement d'un godet d dans lequel sont

déposés quelques cristaux de sulfate de cuivre. Lorsque les deux métaux cuivre et zinc sont mis en communication, l'acide attaquant le zinc prend l'électricité positive qu'il transmet au cuivre; un courant est établi qui amène à son tour la décomposition de l'eau et favorise l'action chimique exercée sur le zinc. L'oxygène porté sur ce dernier métal est absorbé par lui; l'hydrogène, au contraire, est amené sur le cuivre; mais au moment où il prend naissance, il rencontre le sulfate de cuivre dissous, et disparaît en revivifiant le cuivre.

Pile de Bunzen.

317. Dans la pile de Bunzen dont nous avons représenté les diverses pièces isolées d'abord, puis réunies, *fig. 202*, un résultat analogue est produit par une cause différente. Dans cette pile, le cuivre est remplacé par un cylindre creux fait d'un charbon conducteur, le sulfate de cuivre par de l'acide azotique concentré. L'hydrogène entraîné par le courant pénètre dans l'acide azotique, et, au lieu de se dégager

Fig. 202.



à l'état de liberté sur le charbon, il est absorbé par l'acide azotique dont une portion correspondante est en partie désoxygénée. Dans ces deux piles, comme dans toutes les autres, les éléments se groupent toujours en mettant le zinc de l'un d'eux en communication avec le cuivre ou le charbon de l'élément voisin.

Pile de Bunzen.

La pile de Daniel est une des plus constantes dans ses effets, la pile de Bunzen une des plus énergiques; mais elles ne sont économiques ni l'une ni l'autre. La pile de Bunzen a, en outre, cet inconvénient grave de répandre en abondance des vapeurs nitreuses qui corrodent tout ce qu'elles touchent, et qu'il est dangereux de respirer trop long-temps ou en trop grande quantité. Aussi, malgré la faveur dont elle jouit en France, lui préférons-nous la pile de Smée ou même la pile de Sturgeon que chacun peut construire lui-même.

CHAPITRE XV.

APPLICATIONS DES PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DES COURANTS VOLTAÏQUES.

Les applications possibles des propriétés chimiques des courants sont extrêmement nombreuses; elles intéressent également la science et l'industrie.

318. Nous avons vu en quelques mots que l'action chimique d'un courant est constante dans toute l'étendue

Loi des
décompositions
chimiques
par la pile.

du circuit, dans la pile aussi bien que dans le conducteur intermédiaire; que cette action chimique est proportionnelle à l'intensité magnétique du courant et à la quantité d'électricité qui circule. Nous ajouterons que, lorsqu'un même courant traverse simultanément des dissolutions salines ou acides, les quantités d'hydrogène dégagées ou de métal réduit sont exactement proportionnelles aux poids atomiques ou aux équivalents chimiques. Prenons un voltamètre chargé avec une dissolution d'acide sulfurique, et une série de flacons contenant, le premier une dissolution de sulfate de cuivre dans laquelle plongent deux lames de cuivre, le second une dissolution de cyanure double d'argent et de potassium et deux lames d'argent, le troisième une dissolution de chlorure d'or et de cyanure de potassium et deux lames d'or....; puis faisons passer un même courant dans toutes ces dissolutions: toutes les lames négatives recevront un dépôt d'hydrogène, de cuivre, d'argent, d'or...., dont les poids seront proportionnels aux équivalents chimiques de ces diverses substances. Le phénomène, quand il est simple, se passe exactement comme si, dans tous les cas, l'eau seule était primitivement décomposée, et que l'hydrogène, ainsi mis en liberté, se dégageât ou réduisit une quantité équivalente du métal auquel il enlèverait l'oxygène, le chlore ou le cyanogène. Le dépôt s'effectue, de plus, d'une manière régulière sur toute l'étendue de l'électrode négatif qui est immergé dans la dissolution.

Loi de Faraday.

Les arts n'ont pas tardé à mettre à profit cette action réductrice des courants. Nous allons exposer rapidement les divers procédés qu'ils mettent en usage suivant les divers effets qu'ils veulent produire.

§ Ier. — Galvano-plastique.

319. Il n'est pas de corps inorganique ou organique qui ne puisse être recouvert d'une couche de cuivre continue qui l'enveloppe de toutes parts et le préserve ainsi de l'action destructrice de l'air et de l'humidité, et qui cependant reste assez mince pour en laisser apercevoir les détails les plus déliés. Mais pour obtenir des dépôts bien uniformes et qui n'aient qu'une épaisseur de $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{20}$ ou $\frac{1}{10}$ de millimètre d'épaisseur, il faut posséder une sorte d'habileté que la pratique seule peut donner. Voici les précautions générales qu'il faut nécessairement prendre :

Cuvrage
des corps.Précautions
à prendre.

1^o Le cuivre ne se dépose sur l'électrode qu'autant qu'il est bon conducteur. Lorsque le corps que l'on veut cuivrer ne l'est pas, il faut en *métalliser* la surface. On y parvient de diverses manières, et, entre autres, en y appliquant avec un blaireau une couche très-mince de plombagine réduite en poudre impalpable.

2^o Les qualités du dépôt métallique varient beaucoup avec la température du bain, avec son degré de saturation, avec l'intensité du courant. En général, les courants faibles donnent un cuivre si malléable, qu'il se coupe au couteau; à mesure que le courant devient plus fort, le dépôt devient dur, puis cassant, granuleux. Il est donc important de bien régler, sur le genre de résultat que l'on veut obtenir, le nombre d'éléments qu'il convient d'employer. A mesure que le dépôt s'effectue, la dissolution, si on n'y remédiait, s'appauvrirait de plus en plus, et pourrait donner lieu à de fâcheux résultats; il est donc avantageux de faire arriver le courant par un électrode positif en cuivre qui, en s'oxydant, rend à la dissolution le métal qui lui est enlevé d'autre part.

3^o Pour que le dépôt soit régulier, il est également

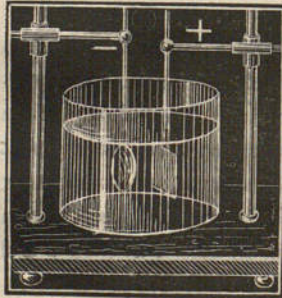
essentiel que le courant se distribue régulièrement sur la surface que l'on veut recouvrir. On parvient à ce résultat en donnant à l'électrode positif soluble une forme analogue à celle de l'objet, ou bien en employant plusieurs électrodes positifs que l'on distribue convenablement autour de cet objet. Le dépôt tend toujours à se faire de préférence sur les points saillants; il faut des précautions très-grandes pour le forcer à s'effectuer dans les creux.

40 Si l'objet à cuivrer était de nature à s'imprégner de la dissolution de sulfate de cuivre pendant le temps qu'il y reste plongé, il faudrait empêcher cette imbibition. On y parvient de la manière suivante pour une médaille en plâtre : on fait fondre dans un plat des morceaux de bougies stéariques dont on a enlevé la mèche, et lorsque la liqueur est bien chaude, on y dépose la médaille, la face en haut, de manière à ce qu'elle s'élève de plusieurs millimètres au-dessus de la surface du bain. La capillarité fait monter l'acide stéarique dans toutes les parties du plâtre qui se trouve ainsi complètement imprégné de la matière grasse, sans que le dessin ait éprouvé la plus légère altération.

Reproduction
des médailles.

320. Lorsque l'on veut reproduire une médaille, et non-seulement la cuivrer, il faut donner au dépôt plus d'é-

Fig. 203.



paisseur après avoir eu soin d'entourer l'objet d'un corps mauvais conducteur, tel qu'une feuille de cuivre recouverte de cire à l'extérieur, afin que le dépôt puisse en être aisément détaché. C'est pour la même raison que M. Boquillon expose un instant les médailles métalliques qu'il veut reproduire à la fumée blanche produite par la combustion d'un corps

résineux ; le dépôt léger et presque invisible qui la recouvre suffit pour empêcher l'adhérence sans nuire à la formation du dépôt.

On est parvenu, à l'aide du procédé dont nous n'avons pu donner qu'une idée très-sommaire, à reproduire les planches gravées sur cuivre, sur acier, les clichés, des dessins exécutés sur métal au moyen de vernis, et même des dessins imprimés sur papier. Les épreuves daguerriennes se reproduisent de la même manière avec une fidélité remarquable.

Reproduction
des clichés,
des planches
gravées, etc.

§ II. — *Dorure, argenture, etc.*

321. Au lieu d'une dissolution d'un sel de cuivre, si nous employons une dissolution d'un sel d'argent ou d'or, ces métaux, se déposant en couche mince, produiront des argentures ou dorures d'une grande beauté et qui peuvent acquérir en même temps une grande solidité.

On s'était beaucoup préoccupé, depuis quelque temps, des effets toxiques souvent redoutables produits par les vapeurs de mercure auxquelles il est à peu près impossible de se soustraire entièrement dans l'emploi du procédé ordinaire d'argenture ou de dorure. M. Elkington avait imaginé le procédé suivant, dans le but de faire disparaître ces dangers.

322. Mélangez 435 parties d'eau, 435 parties d'acide azotique, densité 1,45, et 435 parties d'acide chlorhydrique, densité 1,15 ; faites dissoudre dans la liqueur 155 parties d'or, chauffez pour éclaircir, décantez et versez dans un vase de fer ; ajoutez ensuite 18000 parties d'eau et 9000 parties de carbonate de potasse, et faites bouillir pendant deux heures. Plongez alors dans la liqueur bouillante les pièces de cuivre et de laiton que vous voudrez dorer après les avoir dérochées et décapées, et agitez-les doucement, jusqu'à ce

Dorure
au trempé.

qu'elles soient convenablement dorées, ce qui n'exige que quelques instants; lavez-les à grande eau, et séchez-les à la sciure de bois chaude. Dans cette opération, il se dépose, par décimètre carré de surface, 30 à 40 milligrammes d'or; sur la même étendue, la dorure au mercure varie de 50 à 250 milligrammes.

Dorure
et argenture
galvaniques.

323. La dorure et l'argenture par les courants électriques paraissent offrir plus d'avantage; aussi ont-elles pris un développement considérable, et peuvent-elles aujourd'hui être classées parmi les arts industriels. On mélange des dissolutions de chlorure d'or et de cyanure de potassium dans des proportions qui ne sont pas restreintes entre des limites très-étroites; c'est dans ce mélange plus ou moins chaud que l'on plonge le métal à dorer, après l'avoir mis en communication avec le fil négatif de la pile. Le fil positif de cette même pile est mis, au contraire, en communication avec une lame d'or qui restitue au bain le métal déposé sur l'objet à dorer. Dans cette opération, comme dans le cuivrage précédemment décrit, l'intensité du courant doit être réglée d'après les conditions de température, de concentration en or et potassium du bain, et surtout d'après l'étendue des pièces à dorer. Ce procédé est applicable non-seulement au cuivre et au laiton, mais encore à l'argent, au maillechort, au fer et à l'acier. Toutefois, pour les métaux facilement oxydables, il est important de plonger dans la liqueur, d'abord l'électrode positif, puis après l'objet à dorer, afin que le courant passe dès que cet objet touche la dissolution saline.

L'argenture se fait de la même manière en employant un bain de cyanure double d'argent et de potassium.

§ III. — *Coloration par l'oxyde de plomb.*

324. La coloration des métaux par l'oxyde de plomb à l'aide de la pile paraît également destinée à recevoir des applications très-étendues. Découverte par Priestley, étudiée par Nobili, elle a atteint un grand degré de perfection entre les mains de M. Becquerel, dont nous allons indiquer le procédé en peu de mots.

On fait bouillir de la litharge dans une dissolution de potasse caustique que l'on sature ainsi de protoxyde de plomb. La liqueur est ensuite versée dans un très-large bocal de verre dans lequel on pose le corps préalablement décapé que l'on veut soumettre à l'expérience, et qui doit être mis en communication avec le pôle positif d'une pile. Le pôle négatif de cette même pile est terminé par une pointe très-fine en platine que l'on plonge dans la dissolution, et que l'on promène à une petite distance de la surface métallique. L'opération marche très-rapidement, une minute est à peine nécessaire; convenablement conduite, elle produit des colorations extrêmement éclatantes. Dès que le résultat désiré a été obtenu, on enlève les pièces, on les lave promptement, on les sèche et on les recouvre d'un vernis formé de 500 parties huile de lin, 4 à 8 parties litharge fine, 2 parties de sulfate de zinc, le tout exposé à une chaleur modérée pendant plusieurs heures.

M. Becquerel est également parvenu, par des moyens analogues, à recouvrir le fer et l'acier d'une couche très-adhérente et à peu près inaltérable d'oxyde de fer ou de plomb.

CHAPITRE XVI.

THERMO-ÉLECTRICITÉ.

Nous terminerons l'électricité par l'examen des phénomènes qui semblent accuser une analogie très-grande entre les forces électriques et la chaleur.

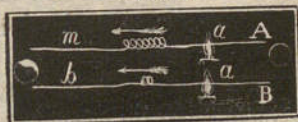
325. Nous avons vu déjà que l'électricité, dans ses déplacements, produit souvent de grands effets de chaleur et de lumière. Nous devons généraliser ce fait. Partout où un courant éprouve une *résistance*, il y a *production* de chaleur en même temps que *diminution* dans l'intensité de ce courant. Ces trois phénomènes sont toujours concomitants, et présentent entre eux des rapports très-dignes d'intérêt : il semble que, dans ces cas, l'électricité se transforme en chaleur. C'est surtout aux surfaces dissimétriques ou aux surfaces de contact de deux conducteurs de natures différentes que le phénomène devient remarquable. Le développement de chaleur y est non-seulement plus intense ordinairement, mais encore il n'est pas le même, suivant que le courant traverse la surface dans un sens ou dans l'autre.

Chaleur et froid
produits
aux surfaces
dissimétriques.

Bien plus, dans quelques circonstances, il peut y avoir production de froid. Ainsi, quand un courant faible traverse une soudure bismuth-antimoine, en allant de l'antimoine au bismuth, il y a production de chaleur ; il y a *production de froid*, au contraire, quand le courant marche du bismuth à l'antimoine. Ces faits nous prouvent incontestablement que les surfaces de contact de deux conducteurs hétérogènes sont inégalement bien traversées dans les deux sens par un même courant, et cette dissymétrie des surfaces joue certainement un rôle dans la production ou la direction des courants.

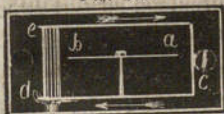
326. Réciproquement, la chaleur produit des courants comme les actions chimiques. Prenons un long fil de platine bien homogène, soudons-en les deux bouts aux deux extrémités du fil d'un galvanomètre bien sensible, puis chauffons-le en son milieu : aucun effet électrique ne sera

Fig. 204.



produit. Mais roulons le fil en spirale serrée, fig. A, et chauffons-le en *a* ; un courant naîtra marchant de *a* en *m*, et déviara l'aiguille. Réunissons par des crochets les deux bouts décapés de notre fil galvanométrique, et chauffons en *a*, un courant naîtra encore et marchera de *a* en *b*.

Fig. 205.



Le phénomène devient encore plus marqué quand nous chauffons la soudure de deux métaux hétérogènes ; un galvanomètre même n'est plus toujours nécessaire pour en accuser l'existence. Recourbons une lame de cuivre *c* en deux branches parallèles dont nous souderons les deux extrémités aux deux bouts d'un cylindre de bismuth, et chauffons l'une des soudures *d* ; un courant sera produit, allant du cuivre au bismuth par la soudure chaude, ainsi que le constatera la déviation de l'aiguille *a b* suspendue au milieu du cadre métallique.

Si, pendant que nous élevons la température de la soudure *d*, nous portons la soudure *e* au même degré de température, un nouveau courant égal et inverse prendrait naissance, dont l'action neutraliserait celle du premier ; aucun effet ne pourrait être observé.

327. Tous les métaux soudés deux à deux, quand leurs soudures sont inégalement échauffées, peuvent nous fournir ainsi des courants très-appreciables. Leur apparition

Force
électromotrice
des soudures
métalliques.

toutefois ne peut être constatée qu'autant que le circuit qu'ils doivent parcourir est entièrement métallique; leur intensité, ou mieux la force électro-motrice qui leur donne naissance, est trop faible pour qu'ils puissent vaincre la résistance qu'opposent la plupart des liquides à leur transmission. La loi de Ohm est, en effet, applicable aux courants thermo-électriques dans les mêmes limites qu'aux courants hydro-électriques.

Lois
des courants
thermo-
électriques.

328. L'intensité des courants thermo-électriques varie proportionnellement à la différence de température des soudures opposées, tant que cette différence ne dépasse pas certaines limites. Cette circonstance a permis d'employer ces courants comme moyen thermométrique.

Thermomètres
thermo-
électriques.

Pour mesurer les hautes températures, on se sert avec avantage d'un fil de platine et d'un fil de palladium, réunis par l'une de leurs extrémités au moyen d'un nœud, et mis en communication, par l'autre, avec les deux bouts du fil d'un galvanomètre. En plongeant la jonction palladium-platine dans une enceinte échauffée, et laissant toutes les autres à la température ordinaire, une déviation a lieu dans la boussole qui peut être graduée de manière à fournir directement la température que l'on veut connaître.

Un moyen analogue a été employé pour évaluer la température des diverses parties du corps de l'homme et des animaux.

Thermo-
multiplicateur.

329. De tous les électro-thermomètres, le thermo-multiplicateur de MM. Nobili et Melloni est celui qu'il nous importe le plus de connaître ici à cause de l'application qui en a été faite, par M. Melloni, à l'étude des phénomènes de la chaleur rayonnante.

Cet appareil, d'une sensibilité extrême, se compose d'une pile thermo-électrique et d'un galvanomètre.

Fig. 206.

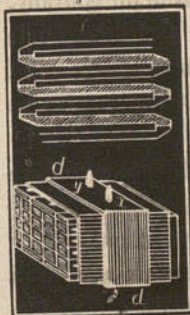
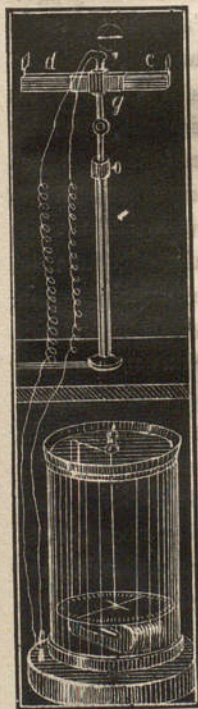


Fig. 207.



ment des corps voisins, et le galvanomètre, dont l'ai-

La pile est formée de petits barreaux de bismuth et d'antimoine inversement recourbés à leurs extrémités, par lesquelles ils sont soudés l'un à l'autre, ainsi que l'indique la figure. La chaîne est ordinairement formée de vingt-cinq couples bismuth et antimoine, dont toutes les soudures paires sont à droite et toutes les soudures impaires à gauche; et, pour qu'elle n'occupe pas une trop grande étendue, elle est repliée sur elle-même en cinq lames parallèles, *fig. 206*, séparées par des lames de carton, ainsi que les divers barreaux le sont les uns des autres, et mastiquées dans un cadre métallique *d*. Les deux extrémités de la chaîne viennent correspondre aux deux cônes *x* et *y* isolés de l'enveloppe *d*, et servant à mettre la pile en communication avec le fil d'un galvanomètre très-sensible. Lorsque l'une des deux faces de la pile est échauffée, l'autre restant à la température ordinaire, chaque soudure chaude donne naissance à une force électro-motrice; et comme, d'après la construction même de la pile, toutes ces forces sont dirigées dans le même sens, leurs effets s'ajoutent. La *fig. 207* nous montre le thermo-multiplier complet; savoir: la pile thermo-électrique *g*, munie des deux pièces *c d* qui servent à abriter ses deux faces contre le rayonnement des corps voisins, et le galvanomètre, dont l'ai-

Pile
thermo-
électrique.

guille, par ses déviations, accuse l'intensité du courant, et par suite la différence de température des deux bouts de la pile. Un thermo-multiplicateur, construit avec soin, peut rendre sensibles des différences de températures de un millième de degré.

Nous verrons bientôt l'usage que M. Melloni a su faire de ce précieux appareil.

Nature
des forces
électriques.

330. Pouvons-nous, en terminant, nous demander ce qu'est l'électricité? La science trop faible encore ne saurait donner à cette question qu'une réponse incertaine et mal assurée. Chaque jour des faits nouveaux viennent agrandir notre horizon; nous entrevoyons dans l'avenir un temps où magnétisme, électricité, chaleur, lumière, seront considérés comme des aspects divers d'un seul agent, seront renfermés dans une même formule. Que sera cette formule? quelle voie nous y conduira? Nous l'ignorons ou à peu près. Nous devons donc conserver encore aux forces électriques leur caractère de forces distinctes, *sui generis*; mais *rien* ne nous autorise à les considérer comme des forces primitives, élémentaires, comme des principes en un mot. Il en est ainsi de toutes les forces de la nature, même des forces organiques et vitales. Nous ne saurions trop le répéter, nous ne connaissons rien par nous-mêmes de la matière et des forces qui l'animent; nous observons des faits isolés; nous les classons en groupes naturels, en genres que nous désignons du nom de la force à laquelle nous les rattachons; puis, à mesure que ces faits se multiplient, que leurs rapports mutuels s'éclaircissent, ces genres se groupent en familles, et les forces correspondantes se réunissent dans une force plus élevée, plus générale. La science monte ainsi lentement, mais incessamment, et montera jusqu'à ce qu'elle atteigne la loi unique et suprême qui régit l'univers.

LIVRE SIXIÈME.

ACOUSTIQUE.

CHAPITRE I^{er}.

DES BRUITS ET SONS.

331. La chaleur, le magnétisme et l'électricité qui ont fait l'objet des livres III, IV et V, nous sont à peu près complètement inconnus dans leur essence; la science est plus avancée pour la lumière, et particulièrement pour l'acoustique dont nous allons aborder l'étude.

Toutes les fois qu'une impulsion mécanique et rapide est transmise à l'organe de l'ouïe, elle fait naître en nous la sensation, particulière à cet organe, d'un bruit plus ou moins intense. Si cette impulsion se répète à des intervalles *réguliers* et *très-courts*, la sensation devient de plus en plus soutenue, uniforme, comparable, et constitue un son. Chacun distinguera nettement un bruit d'un son pur et plein; cependant les limites précises sont difficiles à établir entre ces deux ordres de sensations. Tel bruit, celui de la mer, par exemple, peut n'être qu'un amas de sons très-beaux considérés isolément, mais sans rapports musicaux entre eux; d'un autre côté, divers bruits rapprochés les uns des autres peuvent donner la sensation de rapports musicaux nettement caractérisés.

332. Quoi qu'il en soit, ce qui paraît constituer physiquement le son, c'est la régularité dans la répétition des

Bruits.

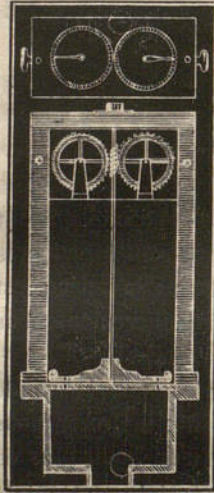
Sons.

Caractères
du son.

impulsions qui arrivent à l'oreille. Si nous prenons une roue dentée, que nous la fassions tourner avec une rapidité croissante sur son axe, et que nous en approchions une carte de manière à ce que celle-ci vienne en frapper les diverses dents, nous entendrons d'abord une série de

Roue dentée

Fig. 208.



Syrène.

petits chocs distincts les uns des autres; ces chocs se presseront de plus en plus, et bientôt nous éprouverons la sensation uniforme et continue d'un véritable son. L'emploi de la syrène conduit au même résultat. Cet instrument se compose d'un tambour en cuivre dont la base inférieure est percée d'une ouverture garnie d'un tube par lequel on peut introduire de l'air ou de l'eau dans l'appareil, et dont la base supérieure est garnie vers sa circonférence de 20 ou 30 petites ouvertures équidistantes. Au-dessus de ce plateau, et à $\frac{1}{2}$ mm environ, se trouve disposé concentriquement et parallèlement à lui un disque de cuivre percé d'un nombre égal de semblables ouvertures, de sorte que ces deux séries d'ouvertures puissent se correspondre exactement. Dans ce cas, le fluide poussé dans le tambour peut s'écouler librement au dehors; mais si le disque supérieur tourne sur lui-même, la correspondance des ouvertures cesse, et l'écoulement s'interrompt pour se rétablir ensuite. Or, lorsque le disque se meut ainsi d'un mouvement uniforme et suffisamment rapide, les secousses qui ont lieu à chaque coïncidence des ouvertures donnent la sensation d'un son musical. Sans aller aussi loin, grattons un corps d'une certaine manière avec une lame métallique

recourbée, et nous entendrons souvent un son soutenu. Or, en examinant le corps ainsi gratté, nous le trouverons, si le mouvement a été régulier, couvert de petits sillons également espacés et produits par des chocs équidistants du ressort contre le corps.

333. Un grand nombre de causes peuvent donner naissance à des bruits; nous rappellerons seulement les principales :

Principales
causes
de production
des bruits.

1^o *La rentrée subite d'un gaz dans une cavité*, ainsi que nous l'avons vu dans l'expérience du crève-vessie, ainsi que cela arrive lorsqu'on tire brusquement un piston d'un tuyau dans lequel il était renfermé. Le gaz s'accumule dans la cavité en vertu de sa vitesse acquise, et une portion en ressort avant que l'équilibre soit établi. Cette oscillation est de trop courte durée pour qu'elle produise autre chose qu'un bruit; cependant en opérant successivement sur des cavités de grandeurs convenables, nous pourrions avoir très-nettement la sensation de l'accord parfait, de l'octave, de la quinte, etc.

2^o *L'expansion ou la production subite d'un gaz*, ainsi qu'il arrive dans la combustion de l'hydrogène et du chlore, de l'hydrogène et de l'oxygène, ou dans l'inflammation de la poudre à canon et des poudres fulminantes.

3^o *Le choc ou la rupture des corps*. Cette cause encore peut donner des sons comparables: ainsi, en prenant quatre billes d'ivoire dont les diamètres sont entre eux comme les nombres 1, $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$, 2, et les choquant avec des billes semblables, nous aurons la sensation d'un accord parfait; seulement, comme ces sons ont moins de durée et moins de pureté que les sons musicaux, on les range dans la classe des bruits.

334. La manière la plus générale de produire les sons musicaux consiste à mettre à profit l'élasticité des corps solides ou l'état vibratoire qui se manifeste dans toutes les

Principales
causes
de production
des sons.

veines liquides ou gazeuses. Nous avons vu, en effet, livre II, chapitre VIII, que quand un liquide s'écoule par une ouverture pratiquée dans la paroi du vase qui le contient, la veine ainsi formée est animée d'un mouvement vibratoire bien manifeste, et que si ce mouvement ne peut être constaté avec une égale évidence sur les veines gazeuses, l'analogie, du moins, porte à l'y admettre. Nous rappellerons toute une série d'instruments de musique fondés sur l'existence de ce phénomène, les instruments à embouchure de flûte. Nous avons vu également que lorsqu'un corps solide est déformé dans des limites inférieures à celles de son élasticité, il tend à revenir à son premier état par une série d'oscillations isochrones exécutées autour de sa position d'équilibre. Ces oscillations se transmettant jusqu'aux parties internes de l'oreille, nous donnent la sensation des sons.

Vibrations
des
corps sonores.

Il est facile, au reste, de se convaincre que toutes les fois qu'un son est produit, le corps sonore qui lui donne naissance est animé d'un mouvement vibratoire appréciable. Les cordes des violons, des basses, des pianos, des harpes, etc., semblent se renfler sous l'influence de ce mouvement; la main appliquée sur la poitrine d'un homme qui parle, sur un tuyau d'orgue qui résonne, perçoit un frémissement particulier; du sable fin répandu sur la surface d'un corps sonore quelconque, s'y agite pendant toute la durée du son. Représentons-nous d'ailleurs la manière dont on fait parler un instrument quelconque, et nous verrons qu'elle a toujours pour effet d'y faire naître des vibrations.

Quant à la régularité d'un mouvement vibratoire, outre que, dans ces cas, elle est une conséquence des lois physiques, nous pouvons nous en faire une idée par une expérience bien simple. Prenons un verre à pied uni et assez large que nous remplirons en partie d'eau, et faisons-

le résonner à l'aide d'un archet que nous promènerons sur son bord; aussitôt que le son se fera entendre, nous verrons la surface de l'eau se couvrir de rides parfaitement régulières.

CHAPITRE II.

CLASSIFICATION DES SONS.

L'oreille peut distinguer dans un son trois qualités bien distinctes :

- 1^o La hauteur, la gravité ou l'acuité;
- 2^o L'intensité;
- 3^o Le timbre.

335. Le timbre est une qualité difficile à apprécier dans ses causes complexes, mais parfaitement évidente en elle-

Fig. 209.



même, et en vertu de laquelle on distingue immédiatement les sons rendus par un instrument en cuivre, par exemple, de ces mêmes sons rendus par un violon ou par une flûte. Le timbre est lié à la nature de l'instrument et à la manière dont il est excité.

336. Lorsque nous attaquons une corde de piano, elle produit toujours le même son, que la touche soit lancée fortement contre elle ou qu'elle ne fasse que l'effleurer; la force ou l'intensité du son varie seule. De même, si nous ébranlons un diapason, et que nous le tenions simplement à la main, il ne rendra qu'un son faible et peu appréciable; mais si nous en appuyons le pied sur une table, une boîte ou un corps sonore quelconque, aussitôt le son acquerra un éclat

Timbre.

Intensité.

remarquable, sans pour cela cesser d'être lui-même, et par le seul effet de la communication du mouvement vibratoire à d'autres corps. L'intensité du son dépend donc de l'amplitude des vibrations du corps sonore ou de l'étendue de la masse vibrante.

Hauteur.

337. Ce qui semble caractériser plus particulièrement un son, est ce que l'on appelle sa hauteur, qualité qui est liée par une dépendance directe avec le nombre ou la rapidité des vibrations. Deux instruments qui parlent à l'unisson, quels que soient leur timbre et leur puissance, vibrent avec la même rapidité, exécutent le même nombre d'oscillations pendant le même temps. A mesure que la succession des chocs devient plus rapide, le son monte, devient plus aigu ou moins grave. C'est ce que les roues dentées ou les syrènes peuvent démontrer avec évidence. Une oreille musicale est même d'une sensibilité excessive sous ce rapport, et elle saura distinguer deux sons qui ne différaient que par quelques vibrations. Un son peut donc être désigné physiquement par le nombre de vibrations par seconde auquel il correspond.

Mesure
des nombres
de vibrations
correspondant
aux divers sons.

338. Plusieurs physiciens se sont occupés de déterminer ce nombre pour les différents sons. Sans nous arrêter à la description des procédés qu'ils ont mis en usage, nous nous bornerons à indiquer en peu de mots comment on peut arriver à ce résultat à l'aide de deux appareils dont nous avons déjà parlé.

Roue dentée.

Une roue dentée a 44 dents je suppose : à chaque révolution de cette roue, la carte qu'on en approchera recevra 44 chocs; si donc, alors qu'elle rend le si de la seconde octave ou si₂, cette roue fait 10 tours à la seconde, le si₂ correspondra à 440 pulsations ou vibrations; de même, si les deux plateaux de la syrène sont percés de 44 ouvertures, à chaque révolution du disque mobile, nous aurons

Syrène.

44 interruptions des veines fluides, et 44 émissions de ces veines; il faudra donc que ce plateau fasse dix tours par seconde pour rendre le si_2 .

339. L'emploi de ces instruments, quoique très-simple en théorie, ne laisse pas que de présenter des difficultés, et d'entraîner dans des longueurs assez grandes; heureusement le problème se trouve singulièrement simplifié par une disposition particulière de notre oreille. Si, à partir d'un son déterminé, quelconque d'ailleurs, on produit une série de sons de plus en plus élevés, on arrive bientôt à un son qui présente avec le premier des analogies tellement grandes, qu'en musique on lui donne le même nom; ce son est l'octave du premier. Or, l'expérience montre que deux sons qui sont à l'octave répondent à des nombres d'oscillations qui sont exactement dans le rapport de 1 à 2.

D'un autre côté, l'intervalle compris entre deux sons à l'octave a été divisé, en musique, par sept sons principaux ou notes, dont l'ensemble constitue la *gamme*. Or, entre ces sons il existe des rapports parfaitement déterminés par la structure de notre oreille ou par l'éducation de cet organe. Ces rapports ne sont autres que les rapports qui existent entre les nombres de vibrations correspondants à ces sons. Nous les inscrivons ici au-dessous des noms qui sont affectés en musique aux divers sons de la gamme.

ut	ré	mi	fa	sol	la	si	ut ₂
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

Ainsi, ut correspond à 132 vibrations par seconde, mi correspondra à $132 \times \frac{5}{4} = 165$, la à $132 \times \frac{3}{2} = 198$, ut₂ à $132 \times 2 = 264$.

Ut₂ est à son tour le point de départ d'une nouvelle octave dans laquelle tous les sons sont à l'octave des sons qui leur correspondent dans la gamme précédente; et cette

Sons
à l'octave.

Gamme.

Rapports
qui existent
entre les sons
de la gamme.

classification embrasse tous les sons principaux employés en musique.

Vérification
de la constance
des rapports
musicaux
qui constituent
la gamme.

340. On comprend de quelle importance est ce fait en acoustique. Grâce à lui, en effet, il nous suffira de déterminer exactement le nombre de vibrations correspondant à l'un des sons d'une gamme quelconque, et nous pourrons en déduire les nombres correspondants aux autres sons de cette même gamme et de toutes les gammes. Aussi a-t-on essayé de le vérifier de bien des manières : la plus simple est due à M. Savart.

Prenons huit roues dentées dont les nombres de dents soient égaux aux nombres 132, 148, 165, 176, 198, 220, 248, 264, ou dans les rapports indiqués plus haut ; fixons toutes ces roues sur un même axe auquel nous imprimerons un mouvement de rotation uniforme et régulier, et approchons une carte de l'une de ces roues. Chaque dent abaissera la carte, puis l'abandonnera et produira en elle une oscillation complète ; un son sera produit. Or, si nous approchons notre carte successivement des deux roues extrêmes, nous entendrons deux sons à l'octave, quelque rapide que soit le mouvement de rotation de l'axe, pourvu qu'il reste le même pendant la durée des deux expériences. La carte promené dans les mêmes conditions au-devant des huit roues, produira toujours la sensation d'une gamme.

La gamme n'est donc pas renfermée dans les limites assignées par l'écriture musicale ; un son quelconque peut lui servir de point de départ, pourvu que ceux qui le suivent soient avec lui dans les rapports voulus. Mais pour que l'écriture et la lecture fussent possibles en musique, il a bien fallu attacher à chaque signe un son défini.

Nombres
de vibrations
correspondant
aux divers sons
musicaux.

341. Le tableau suivant représente les nombres de vibrations correspondant aux divers sons des neuf gammes employées en musique. Pour abrégé, nous n'avons répété

que le nom du son fondamental de chaque gamme avec son signe caractéristique.

	Ut	Ré	Mi	Fa	Sol	La	Si	Ut
Ut ₂ le 1 ^{er} des orgues.	33	37	41	44	49	55	62	66
Ut ₁ le 1 ^{er} des pianos.	66	74	82	88	99	110	124	132
Ut ₁ le 1 ^{er} de la basse.	132	148	165	176	198	220	248	264
Ut ₂ le 1 ^{er} de l'alto...	264	297	330	352	396	440	495	528
Ut ₃ le 1 ^{er} du violon...	528	594	660	704	792	880	990	1056
Ut ₄	1056	1188	1320	1408	1584	1760	1980	2112
Ut ₅	2112	2376	2640	2816	3168	3520	3960	4224
Ut ₆	4224	4752	5280	5630	6336	7040	7920	8448
Ut ₇	8448	9504	10560	11264	12672	14080	15840	16896

L'orgue est le seul instrument de musique qui soit complet et qui embrasse toute l'étendue de l'échelle musicale. Le son le plus grave y est produit par un tuyau appelé gros bourdon, et qui a un peu plus de 10 mètres de longueur quand il est ouvert, et un peu plus de 5 mètres quand il est fermé. Au-delà de ces deux limites, il existe bien encore des sons ; mais ils ne sont plus comparables entre eux, et ne sont pas employés en musique.

Certains insectes produisent en volant de véritables sons qui semblent montrer qu'ils exécutent de 15 à 20 mille battements d'ailes par seconde.

342. Tous les instruments ne peuvent pas jouer un même morceau dans le même ton ; il en résulte des modifications particulières qui doivent être apportées aux divers sons de la gamme.

Reprenons les diverses notes avec leurs rapports.

ut ré mi fa sol la si ut

1 $\frac{9}{8}$ $\frac{5}{4}$ $\frac{4}{3}$ $\frac{3}{2}$ $\frac{5}{3}$ $\frac{15}{8}$ 2.

Intervalles.

Divisons chaque rapport par celui qui le précède, nous aurons ce que l'on appelle *intervalles musicaux*

ut ré, ré mi, mi fa, fa sol, sol la, la si, si ut

$$\frac{9}{8} \quad \frac{10}{9} \quad \frac{16}{15} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{10}{9} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{16}{15}$$

Ton majeur,
ton mineur,
semi-ton majeur.

Ces intervalles sont loin d'être égaux comme on voit. Les trois plus grands ($\frac{9}{8}$) s'appellent *tons majeurs*, les deux moyens ($\frac{10}{9}$) *tons mineurs*, les plus petits $\frac{16}{15}$ *semi-tons*.

Fig. 210.

211.



Imaginons que l'on veuille transposer la gamme naturelle, fig. 210, et l'élever de deux tons. Si nous l'écrivions

simplement comme elle est fig. 211, les intervalles seraient

$$\frac{16}{15} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{10}{9} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{16}{15} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{10}{9}$$

La gamme n'existerait plus. Mais *bémolisons* mi, la et si, ce qui revient à multiplier les rapports correspondants à ces notes par $\frac{2}{5}$, nous aurons pour nouveaux intervalles

$$\frac{10}{9} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{16}{15} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{10}{9} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{16}{15}$$

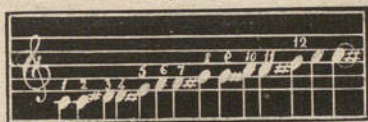
Coma.

qui se rapprochent beaucoup des intervalles de la gamme naturelle. Les deux premiers sont renversés, mais ils ne diffèrent que d'un *coma* que l'on néglige dans tous les instruments à sons fixes. On parviendrait au même résultat en *diésant*, au contraire, les notes fa, sol, ut, ré, ou multipliant par $\frac{5}{4}$ les nombres qui leur correspondent.

343. Les différences que nous avons signalées, très-faibles dans la première gamme, s'accroissent dans les octaves supérieures, parce que l'octave d'une note ne peut subir aucune altération, ce rapport étant celui auquel l'oreille est le plus sensible. Dans les instruments à sons variables, l'artiste modifie son jeu de manière à conserver à chaque

morceau son caractère précis. Dans les instruments à sons fixes, au contraire, comme le piano, il n'en est plus ainsi; on partage alors l'octave exactement en douze parties égales, et la gamme complète et *tempérée* s'écrit comme nous le

Fig. 212.



représentons dans notre figure. Les touches blanches correspondent aux notes naturelles, et les touches noires aux notes altérées. Ut dièse et ré bémol se confondent dans ce cas.

Tempéraments.

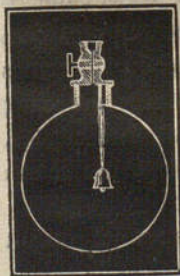
CHAPITRE III.

PROPAGATION DES SONS DANS L'ESPACE.

344. Le son, qui a son point de départ dans le corps vibrant, se propage autour de ce corps avec une vitesse variable avec la nature des milieux qu'il traverse. Caractérisé par une vibration des particules matérielles, il s'arrête là où la matière lui manque. *Le son ne se propage*

Le son ne se propage pas dans le vide.

Fig. 213.



pas dans le vide. Suspendons une petite clochette au milieu d'un ballon à robinet, à l'aide de filaments de chanvre non tordus et dénués d'élasticité; fermons le robinet et agitions la clochette, elle rendra un son que nous pourrions facilement percevoir; mais faisons le vide dans le ballon, et agitions de nouveau la clochette: aucun bruit ne parviendra jusqu'à nous. Le son redeviendra sensible, au contraire, si nous remplissons le ballon avec une vapeur ou un gaz quelconque. Tout milieu doué d'élasticité est apte à propager un son.

Il se propage
dans
tous les milieux
pondérables.

Frappons deux pierres sous l'eau, le bruit qui en résulte sera entendu du rivage. Les sons extérieurs sont perçus par l'ouvrier qui, renfermé dans sa cloche à plongeur, pénètre au sein des eaux. Appliquons de même notre oreille à l'une des extrémités d'une longue poutre dont l'autre extrémité sera légèrement frappée par un corps dur, nous entendrons d'abord un bruit sec et net transmis par la poutre, et ensuite un bruit plus faible transmis par l'air.

Le son se propage, en effet, plus vite même dans les solides et les liquides que dans l'air.

Mesure
de la vitesse
du son dans l'air.

345. Des membres du bureau des longitudes s'étaient placés, dans la nuit du 21 au 22 Juin 1822, les uns sur la hauteur de Montlhéry, et les autres sur celle de Villejuif. A ces deux stations se trouvaient un chronomètre, espèce de montre marquant la seconde avec une grande précision, et une pièce de canon tirant de 10 en 10 minutes, de manière à croiser les feux. Au moment où l'une des pièces faisait explosion, les observateurs de la station opposée apercevaient d'abord la lumière produite par la déflagration de la poudre, et, quelque temps après, le bruit du canon arrivait jusqu'à eux : ils notaient exactement, à l'aide de leur chronomètre, le temps t qui s'écoulait entre l'apparition de ces deux phénomènes. La lumière se propageait avec une vitesse de 80,000 lieues par seconde, le temps employé par l'éclair pour traverser la distance des deux stations était sensiblement nul, et pouvait être négligé. t mesurait donc exactement le temps employé par le son pour parcourir ce même espace.

346. Ces expériences et d'autres analogues ont conduit à ces résultats :

1^o Dans un même milieu et à une même température, le son se propage avec une vitesse constante;

2° Cette vitesse croît avec la température du milieu ;

3° A la température de 10°, la vitesse du son dans l'air est de 337 mètres par seconde ;

4° La vitesse du son dans l'eau est de plus de 1400 mètres par seconde, plus de quatre fois la vitesse dans l'air ;

5° La vitesse du son dans les solides est encore de beaucoup supérieure à ce dernier chiffre.

Une expérience journalière peut nous donner une idée de la transmission progressive du son dans l'espace. Nous avons vu souvent, dans la campagne, le marteau qui a frappé un coup, relevé et prêt à en frapper un second avant que le premier soit arrivé jusqu'à notre oreille. Nous savons également que l'on mesure approximativement la distance d'un orage par le temps qui s'écoule entre l'apparition de l'éclair et l'audition du tonnerre. A chaque pulsation du pouls correspond une distance de 300^m environ.

347. Le son ne conserve pas son intensité primitive à mesure qu'il s'éloigne de son point de départ, surtout s'il se propage dans un milieu illimité dans tous les sens. Dans ce dernier cas, en effet, il s'étend sphériquement autour de son point d'origine, et, se dispersant sur une surface dont l'étendue varie comme le carré de son rayon, il diminue d'intensité en raison inverse de la surface qu'il embrasse, ou en raison inverse du carré de sa distance à son point de départ. Le son décroît beaucoup moins rapidement d'intensité lorsqu'il se propage dans un espace limité comme un tunnel. En appliquant l'oreille à l'extrémité d'une longue suite de tuyaux réunis bout à bout, sur une longueur de 1000^m environ, on peut encore entendre les battements d'une montre située à l'autre extrémité, ainsi que M. Biot s'en est assuré.

Variation
de l'intensité du
son
avec la distance.

348. Tous les sons, de quelque nature qu'ils soient, se propagent avec la même vitesse dans un même milieu ;

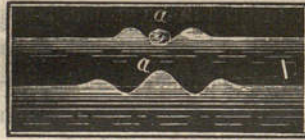
Tous les sons
se propagent avec
une
égale vitesse.

du moins, en faisant exécuter sur la flûte un morceau de musique à l'un des bouts de la conduite, M. Biot ne remarqua aucune altération dans la mélodie du chant à son arrivée à l'autre extrémité du tuyau, ce qui n'aurait pas pu avoir lieu si les sons divers eussent mis des temps sensiblement inégaux pour parcourir cet intervalle de 1^{km} environ.

Ondes aqueuses.

349. Chacun de nous a jeté ou vu jeter quelque pierre à la surface d'une eau tranquille, et a examiné les ondes qui, partant du lieu où le choc a été produit, s'étendent circulairement à la surface de l'eau, et la traversent suc-

Fig. 214.

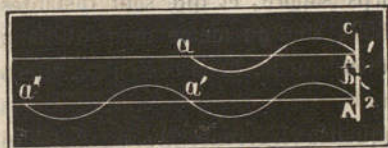


Ondes sonores.

cessivement dans toute son étendue. La surface liquide, à l'endroit où le corps étranger a troublé son repos, a été déprimée d'abord, fig. 214, puis, reprenant son niveau, elle l'a dépassé en sens inverse pour y revenir ensuite; deux ou trois oscillations semblables sont ainsi produites en α . Ces oscillations se transmettent successivement aux parties voisines, de celles-ci aux suivantes, en sorte que chaque molécule de la surface liquide passe à son tour par les phases de mouvement qui ont été observées en α . Un effet analogue est produit quand un son se propage dans l'air. Une explosion a lieu dans un point de l'atmosphère; l'air est refoulé tout autour de ce point, puis, l'effet terminé, cet air revient vers sa position première; une condensation succède à la dilatation, et une série plus ou moins grande d'oscillations semblables s'effectue en ce même point. Ces oscillations se transmettent successivement de couche en couche aux divers points de l'atmosphère qui exécutent une série d'oscillations isochrones aux oscillations primitives. Seulement, tandis qu'à la surface de l'eau le mouvement ondulatoire s'effectue perpendiculairement au plan sur lequel il se propage, dans

l'air il a lieu dans la direction même dans laquelle se transmet le son.

Fig. 215.



Une molécule d'eau soulevée en c par une cause quelconque, redescend en b pour revenir en A ,

puis en c , et exécute ainsi plusieurs oscillations successives. Si, pendant la durée d'une de ces oscillations complètes, l'ébranlement parcourt à la surface de l'eau une distance Aa , à la fin de la première oscillation complète de A , la molécule a sera sur le point de commencer cette même oscillation, et sur la ligne Aa , fig. 215-1, nous aurons une série de points qui seront au même moment dans les phases diverses par lesquelles est passée A ; nous verrons représenté dans l'espace ce qui s'est produit dans le temps en A . A la fin de la deuxième oscillation complète de A , le phénomène aura l'aspect, fig. 215-2. Ce que nous voyons apparaître à la surface de l'eau se produit d'une manière invisible au sein de l'air agité par l'action d'un corps sonore.

Dans son mouvement, un corps sonore A va de b en c , puis de c en b . Une seconde après, une couche d'air située à 337 de la première, oscillera d'une manière semblable; et mettra, pour exécuter ce double mouvement, précisément le temps employé par A pour exécuter le sien.

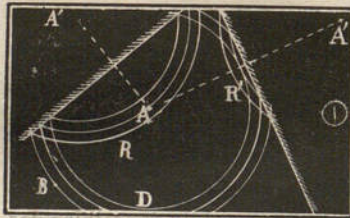
La distance Aa ou la distance égale $a'a'$; porte, dans l'un des cas, le nom de longueur d'onde aqueuse, dans l'autre le nom de longueur d'onde sonore. L'étendue d'une onde sonore dans un milieu donné varie avec la vitesse du son dans ce milieu et la hauteur du même son. L' ut_1 correspond à 132 vibrations par seconde; chaque vibration dure donc $\frac{1}{132}$ de seconde, et l'espace parcouru par le son dans l'air pendant le même temps $\frac{337}{132} = 2^m,553$. Telle est la longueur

Longueur
d'onde.

de l'onde sonore pour l'ut₁. Lorsqu'un pareil son est produit, toutes les molécules qui sont situées sur une ligne passant par le corps sonore, et qui sont distantes l'une de l'autre de 2^m,553, sont au même moment dans la même phase de leur mouvement, mais elles n'exécutent pas la même oscillation.

Réflexion
des ondes.

350. Lorsqu'une onde aqueuse vient rencontrer un obstacle, nous la voyons se replier sur elle-même, *fig. 216*, et se propager en arrière comme si elle partait d'un point



comme si elle partait d'un point A' symétrique du centre A par rapport à l'obstacle. Au bout d'un certain temps, l'onde directe atteindra un point B de la surface liquide; mais

l'onde réfléchie y parviendra à son tour, en sorte que, par l'action de l'obstacle, deux ondes, au lieu d'une, arriveront en B; il y en arriverait trois successives si deux obstacles donnaient naissance à deux réflexions.

Échos.

351. Un phénomène analogue a lieu dans l'air pour les ondes sonores, et devient l'origine des échos. L'onde directe D donne le premier son, ordinairement le plus fort; l'onde réfléchie R produit l'écho dont l'origine paraît être non plus en A, mais en A' centre véritable de l'onde R.

Les obstacles solides ne sont pas absolument nécessaires à la production des échos; toute surface de séparation de deux milieux dissemblables peut lui donner naissance. Aussi les nuages contribuent-ils à prolonger les éclats du tonnerre.

Lorsqu'une voix interroge un écho, le temps que celui-ci met à répondre dépend de sa distance. Le son parcourant 337^m environ par seconde, devant un obstacle situé à $\frac{337}{2}$

168^m, la voix mettra 1^{re} pour revenir au point de départ; et comme, en parlant, on peut articuler 4 syllabes par seconde, l'écho répétera 4 syllabes. Il existe des échos qui répondent à 14 ou 15 syllabes. A Villa-Simonetta, près de Milan, on en visite un qui reproduit près de 40 fois le son, grâce à des réflexions multiples opérées sur les murs et le sol d'un ancien couvent.

Il existe, dans l'une des salles du Conservatoire des arts et métiers, à Paris, un écho remarquable sous un autre rapport. Deux personnes situées aux deux angles diagonalement opposés de cette salle, peuvent établir entre elles une conversation à voix basse sans que les personnes qui sont situées entre elles puissent l'entendre. La partie de l'onde sonore qui vient frapper la voûte elliptique de cette salle s'y réfléchit de manière à converger tout entière vers l'angle opposé, et cette concentration rend perceptibles des sons qui sans cela ne l'eussent pas été.

Les réflexions successives du son à la surface des parois d'un porte-voix finissent par modifier l'onde sonore, et lui donner une grande tendance à se propager au dehors dans la direction même de l'axe de l'instrument plus efficacement que dans toute autre, ce qui explique les effets produits par cet instrument.

Ces mêmes réflexions impriment un caractère particulier aux vibrations des masses d'air renfermées dans un espace limité, ainsi que nous le verrons dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV.

VIBRATIONS DE L'AIR DANS UN ESPACE LIMITÉ.

352. Lorsqu'un mouvement vibratoire se propage au travers d'une colonne d'air renfermée dans un tuyau,

Vibrations
de l'air
dans les tuyaux.

chaque couche gazeuse ne passe plus, comme à l'air libre, isolément et à son tour par les diverses phases du mouvement exciteur; toute la colonne se divise en parties dont la longueur est précisément égale à la longueur d'onde du son produit, et qui vibrent toutes en même temps et à l'unisson, mais dans des directions opposées deux à deux.

Nœuds.

Les surfaces qui séparent ces portions vibrantes, et que l'on appelle nœuds, sont toujours en repos, mais elles sont alternativement condensées et dilatées. Les couches situées à égale distance de deux nœuds consécutifs se nomment des ventres; elles subissent les déplacements les plus grands, mais ne sont ni dilatées, ni condensées.

Ventres.

Rapports
entre la longueur
d'un tuyau
et la longueur
de l'onde
qui s'y établit.

353. Pour qu'un tel mouvement s'établisse avec facilité dans un tuyau, il faut qu'il y ait un rapport simple entre la longueur de l'onde et celle du tuyau. Si le tuyau est ouvert aux deux bouts, sa longueur devra contenir un nombre entier de longueurs d'onde; s'il est fermé, au contraire, il devra contenir dans sa longueur un nombre entier de longueurs d'ondes, plus une demi-longueur.

Renforcement
des sons
par les tuyaux.

Lorsque ces conditions sont remplies, le mouvement ondulatoire de la colonne d'air donne au son qui en a déterminé la production une intensité remarquable.

Fig. 217.



Prenons un fort timbre, et faisons-le parler avec un archet, il rendra par lui-même un son fort et soutenu; mais si nous en approchons un tuyau qui puisse vibrer à l'unisson du timbre, il en résultera

un renforcement qui a quelque chose de surprenant.

354. C'est sur cette propriété des tuyaux qu'est fondée la théorie des instruments à embouchure de flûte. La lame

Fig. 218.



d'air qui s'échappe par l'embouchure est animée d'un mouvement vibratoire, § 112. Ce mouvement ne produirait à lui seul que des effets peu appréciables à cause de la faible masse de la lame gazeuse ; mais il se communique au tuyau, et acquiert par là l'intensité quelquefois considérable que nous lui voyons. La même cause fait que le mouvement vibratoire de la lame gazeuse est facilement modifié par les circonstances, aussi s'adapte-t-il toujours au tuyau qui doit le renforcer. Une même embouchure peut donc

Instruments
à embouchure
de flûte.

faire parler des tuyaux de différentes longueurs, et leur faire rendre des sons très-divers. Cependant, pour que les sons aient toute leur beauté, il faut adapter à chaque tuyau une embouchure particulière, ou insuffler dans une même embouchure des courants d'air d'une ampleur ou d'une vitesse appropriées.

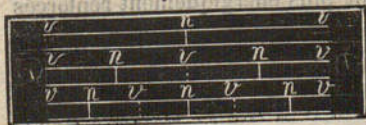
355. Dans un jeu d'orgues, chaque tuyau rend un son unique ; sa longueur doit être égale à la longueur d'onde du son qu'il produit s'il est ouvert, égale à la moitié de cette longueur s'il est fermé.

Orgues.

Dans la flûte, au contraire, le tuyau est unique ; mais il est percé d'ouvertures qui obligent la colonne d'air à se partager en parties de longueur voulue. On doit se rappeler qu'à chaque nœud l'air étant alternativement condensé et dilaté, il ne peut se former de nœuds au niveau des ouvertures qui font communiquer la colonne d'air vibrante avec l'air extérieur.

Flûte.

Fig. 219.



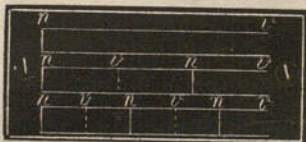
Un même tuyau sans ouvertures latérales peut encore rendre plusieurs sons. La colonne d'air,

Sons
harmoniques
des tuyaux.

ouverts,

si le tuyau est ouvert aux deux bouts, peut s'y diviser, en effet, comme le représente la *fig. 219*, dans laquelle les longueurs d'ondes, distances de deux nœuds ou de deux ventres consécutifs, sont entre elles comme les nombres $1 \frac{1}{2} \frac{1}{3} \frac{1}{4} \dots$, et les sons correspondants comme les nombres $1, 2, 3, 4 \dots$: c'est-à-dire qu'un même tuyau peut renforcer les sons $ut_1, ut_2, sol_2, ut_3, \dots$, ou bien d'autres sons qui soient entre eux dans les mêmes rapports.

fermés.

Fig. 220.

Un tuyau fermé peut renforcer également plusieurs sons correspondant aux divisions de la colonne d'air représentées dans la *fig. 220*.

Les longueurs d'ondes correspondantes étant entre elles comme les nombres $1 \frac{1}{3} \frac{1}{5} \frac{1}{7} \dots$, les sons seront entre eux comme les nombres $1, 3, 5, 7 \dots$.

C'est sur cette propriété qu'est fondé le cor-de-chasse et les instruments analogues.

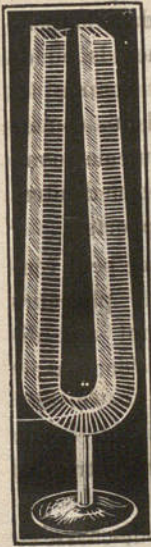
356. Dans les caisses ou dans les appartements, les vibrations de l'air sont analogues et plus compliquées encore.

Vibrations
dans
des masses d'air
d'une
grande étendue.

Faisons résonner, dans une pièce un peu grande, un son grave, intense et bien soutenu, promeneons notre oreille ou une membrane recouverte de sable dans les divers points de l'appartement, nous reconnaitrons, à l'affaiblissement du son ou au repos de la membrane, l'existence de surfaces nodales entre-croisées isolant des parties vibrant avec une grande intensité. L'air d'une salle vibre toujours ainsi à l'unisson du son qui y est produit ; mais, suivant la grandeur ou la forme de la masse d'air, il y aura toujours une série de sons qui seront plus énergiquement renforcés par elle.

Même effet est produit dans les caisses des instruments à cordes.

Fig. 221.



Prenons un fort diapazon, faisons-le vibrer ; il rendra un son peu intense : si nous le plaçons sur une table, sur un corps sonore quelconque, le son se développera notablement ; mais si nous le posons sur une caisse de dimensions telles qu'elle vibre naturellement à l'unisson de l'instrument, nous obtiendrons des effets d'une puissance extraordinaire.

Les cordes d'un piano, d'une harpe, d'un violon, tendues entre deux obstacles immobiles, rendront, sous l'archet ou les doigts, des sons presque imperceptibles ; mais si elles sont mises en communication avec leur caisse, ces sons reprennent leur éclat accoutumé. Les tables de ces instruments jouent un très-grand rôle dans le renforcement des sons ; mais le rôle de l'air contenu dans la caisse n'est pas moindre. L'étendue de cette masse d'air est réglée sur la nature des sons qu'elle doit renforcer. Un violon dont la caisse serait trop grande rendrait les sons graves avec une grande puissance et une grande pureté, mais les sons aigus en seraient défectueux, et inversement.

Renforcement des sons par les caisses des instruments de musique.

CHAPITRE V.

VIBRATIONS DES CORPS SOLIDES.

357. Si nous ébranlons un corps solide, nous produirons en lui des vibrations qui ont une très-grande analogie avec les vibrations des masses gazeuses.

Prenons une tige métallique ou une tige de verre,

Vibrations longitudinales des tiges.

pinçons-la en son milieu avec les doigts, et promenons longitudinalement à sa surface une étoffe de laine recouverte de colophane ou trempée dans une eau acidulée. Nous produirons un son dont la hauteur sera en rapport avec la longueur de la tige et avec la vitesse du son dans la substance dont elle est formée; la longueur de l'onde correspondant au son produit dans cette substance, sera encore égale à la longueur de la tige, ou égale au tiers, au cinquième de cette longueur.

Vibrations
transversales
des lames.

Opérons sur une lame métallique ou sur une lame de verre; après l'avoir fixée en son centre, et avoir projeté du sable à sa surface, promenons un archet sur l'un de ses bords, un son sera produit; en même temps nous verrons le sable, vivement agité, se réunir sur des lignes nodales où il restera sensiblement en repos. On peut ainsi faire rendre à une même plaque un grand nombre de sons différents: à chacun d'eux correspond un système particulier de lignes nodales. Faisons vibrer un corps en présence d'une membrane horizontalement tendue et saupoudrée de sable; un effet analogue se produira: des lignes nodales apparaîtront d'autant plus serrées que le son sera plus aigu.

Vibrations
des cordes.

358. Les vibrations des cordes et des lames présentent pour nous un intérêt particulier à cause des applications qu'on en fait aux instruments de musique.

Le son rendu par une corde tendue entre deux points fixes dépend de circonstances variées. Le calcul et l'expérience ont démontré les quatre lois suivantes: le nombre d'oscillations battues par une corde est,

Lois
des vibrations
des cordes.

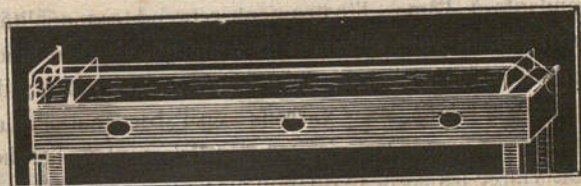
1^o Inversement proportionnel à la longueur de cette corde. En la réduisant à des longueurs qui soient entre elles dans les rapports $1 \frac{8}{9} \frac{4}{5} \frac{3}{4} \frac{2}{3} \frac{3}{5} \frac{8}{15} \frac{1}{2}$, on lui fait donc rendre les sons ut_1 ré mi fa sol la si ut_2 .

2^o Inversement proportionnel au diamètre de la corde.

3^e Proportionnel à la racine carrée du poids qui la tend.
 4^e Inversement proportionnel à la racine carrée de la densité de la substance dont est formée la corde.

359. Ces quatre lois, que l'on peut démontrer expérimentalement à l'aide du monocorde ou sonomètre, *fig. 222*,

Fig. 222.



Monocorde
ou sonomètre.

sont mises à contribution dans la construction des instruments à cordes, et dans la formation des sons qu'on en tire. Dans un piano, par exemple, les cordes qui doivent rendre les sons aigus sont courtes (1), fines (2), fortement tendues (3) et en fer, substance peu dense relativement à sa tenacité (4). Les sons moyens sont rendus par des cordes plus longues, plus grosses, relativement moins tendues, et d'un métal plus dense : le cuivre. Pour les sons graves, on emploie un nouvel artifice : les cordes sont entourées d'un fil métallique qui en augmente la masse sans en accroître l'élasticité, et qui par cela même abaisse le son.

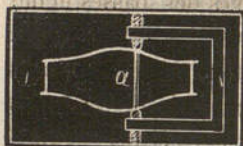
Pianos.

360. Tous les instruments à corde ont une table d'harmonie et une caisse destinées à renforcer les sons et à leur donner un caractère particulier de douceur, de moelleux, ou de vigueur et de mordant. C'est surtout dans le violon, la basse, etc., que l'on peut apprécier combien est grande l'influence de la caisse sur la qualité des sons d'un instrument. Sous le pied du chevalet correspondant à la chanterelle, se trouve une petite colonne de bois qui, allant d'une table à l'autre, semble destinée à soulager la table supérieure de l'énorme pression qu'elle supporte : c'est

Tables
d'harmonie.

Violons.

Fig. 223.

Ame
des violons.

l'âme. Otons l'âme d'un violon, immédiatement les sons rendus deviennent maigres, désagréables, semblables à ceux de la vielle : à l'aide d'une mâchoire à vis, comprimons extérieurement les deux tables aux points correspondants à l'âme, l'instrument reprend ses qualités. Un changement correspondant se remarque dans le mode de vibration des tables. Si nous répandons, en effet, du sable sur ces tables, nous verrons, en l'absence de l'âme, les grains de poussière s'agiter parallèlement à l'archet qui fait vibrer les cordes : quand l'âme est placée, au contraire, le sable saute toujours perpendiculairement aux tables. L'âme modifie le mouvement vibratoire des tables ; elle le transforme ; mais aussi elle en restreint la durée. Un violon ne parle bien que sous l'archet. Tout concourt, au reste, à la beauté des sons rendus par cet instrument : le manche, le chevalet et sa forme bizarre, l'archet lui-même qu'on a en vain essayé de remplacer par des archets en acier.

Vielle.

Harpe.

Sons
harmoniques
des cordes.

Dans les instruments à cordes qui n'ont pas d'âme, ou bien les sons rendus sont faibles comme dans la vielle ; ou bien la disposition des cordes comme dans la harpe, leur mode d'ébranlement comme dans le piano, obligent la table à vibrer perpendiculairement à sa surface.

361. Il est rare qu'une corde un peu longue ne rende qu'un son à la fois. Outre le son fondamental qui correspond à la corde vibrant d'une seule pièce dans toute sa longueur, cette corde se partage simultanément en 2, 3, 4, 5 parties qui vibrent séparément et produisent des sons qui, se superposant, donnent au son total son caractère particulier. Ces sons supplémentaires, qui sont entre eux comme les nombres 2, 3, 4, 5, s'appellent sons harmoniques. Une oreille exercée les distingue nettement les uns

des autres, surtout dans les sons graves des basses et des pianos.

362. Les lois du mouvement vibratoire des lames fixées par une de leurs extrémités diffèrent des précédentes ; les nombres d'oscillations qu'elles exécutent pendant l'unité de temps varient :

1^o En raison inverse du carré de leur longueur ;

2^o En raison directe de leur épaisseur.

La largeur des lames accroît l'intensité du son sans en modifier la hauteur. Il n'en est plus ainsi de la nature de ces lames, qui exerce, au contraire, une grande influence sur l'effet produit.

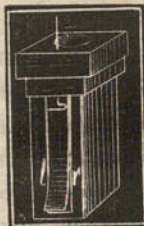


Fig. 224.

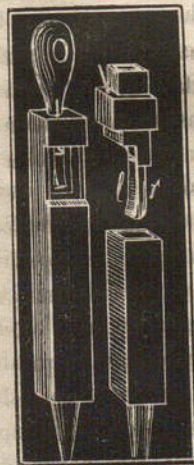


Fig. 225.

363. C'est sur l'emploi des lames vibrantes qu'est fondée la construction des tuyaux à anche. L'anche est formée par une petite lame métallique appliquée sur une ouverture qu'elle ferme incomplètement, et par laquelle s'échappe un courant d'air. La vibration de l'air se transmet à la lame qui

oscille rapidement. Quand la lame peut pénétrer librement au travers de l'ouverture qu'elle garnit, l'anche est dite libre ; quand, au contraire, elle est plus grande que l'ouverture, et vient frapper contre les bords de la rigole *r*, on dit qu'elle est battante. Dans ce dernier cas, la vibration de l'anche et le son qu'elle rend se trouvent modifiés par les chocs répétés de la languette contre sa rigole. Le son a quelque chose de nasillard ; cependant, mêlé aux jeux de flûte de l'orgue, il produit des effets supérieurs à ceux des anches libres.

Lois
du mouvement
vibratoire
des lames.

Instruments
à anche.

Anche libre.

Anche battante.

- L'anche est presque toujours placée entre deux tuyaux : l'un inférieur, le tuyau d'arrivée ; l'autre supérieur, le *tuyau d'échappement*. Tous deux influent sur la qualité des sons ; le dernier surtout modifie ceux-ci d'une manière remarquable. Un tuyau conique allongé, ouvert à sa partie supérieure et évasée, produira des sons éclatants analogues à ceux de la trompette ; un tuyau en forme de poire, percé seulement d'une ouverture latérale, donne au son les qualités particulières qu'on lui remarque dans les orgues expressifs.
- 364.** Dans les instruments de l'espèce du basson et de la clarinette, l'anche est en bois formée avec une espèce de roseau. Le ton est alors donné par le tuyau de renforcement percé d'ouvertures latérales comme la flûte, et par la pression des lèvres qui modifie à volonté la longueur de la partie libre de l'anche.
- 365.** La voix humaine a été l'objet d'expériences et de théories nombreuses. Les opinions ont été long-temps et sont encore partagées sur la manière dont nous produisons des sons. Il est probable que l'origine de la voix est double, au moins chez l'homme. Dans la voix de poitrine, les cordes vocales, replis de la muqueuse laryngienne, vibrent comme les lèvres dans le bocal des instruments en cuivre ; mais il est possible que, dans la voix de tête, l'effet soit analogue à celui qui est produit par le passage de l'air au travers des deux ouvertures d'un apanou.
- Tuyau d'arrivée.
- Tuyau d'échappement.
- Orgues expressifs.
- Basson.
- Clarinette.
- Cor. Trompette.
- Voix humaine.
- Voix de poitrine.
- Voix de tête.

LIVRE SEPTIÈME.

OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE.

CHAPITRE Ier.

MODE GÉNÉRAL DE PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

366. La lumière présente avec le son des analogies remarquables. Le son est constitué par un mouvement vibratoire qui se propage au travers des milieux pondérables jusqu'aux nerfs auditifs, et par la modification que ceux-ci transmettent à leur tour jusqu'au cerveau : la lumière est due à un mouvement vibratoire qui vient impressionner nos nerfs optiques, et, par l'intermédiaire de ceux-ci, notre cerveau lui-même. La rapidité du mouvement sonore donne lieu aux sons si nombreux que nous avons essayé de classer dans le livre précédent ; la rapidité du mouvement lumineux engendre ces couleurs si variées et si éclatantes que nous offre à profusion la nature.

Mais l'agent de la transmission, et par suite la nature et les propriétés de ce mouvement ondulatoire, sont essentiellement distincts dans les deux cas. Le son s'arrête aux limites où cesse la matière pondérable ; la matière pondérable, au contraire, est souvent un obstacle insurmontable à la propagation du mouvement lumineux. C'est dans les espaces planétaires où la matière nous apparaît dans son degré de raréfaction et de simplicité le plus grand, que la lumière se propage avec le plus de vitesse et de liberté. Elle est quelquefois plus amoindrie, en effet, dans

Vibrations
lumineuses.

Transmission
de
la lumière
au
travers du vide.

son intensité par quelques lieues de la couche atmosphérique, qu'elle ne l'est dans l'immense trajet qu'elle doit parcourir pour arriver du soleil jusqu'à nous.

367. La lumière agissant sur l'organe qui lui est spécialement destiné, produit en nous une impression déterminée; mais là n'est pas bornée son action. Ici elle réveille ou stimule les fonctions endormies de la force vitale; là elle produit des actions chimiques ou physiques; son influence est immense sur la nature vivante ou morte.

Notre rôle est limité dans ce livre, où nous ne saurions embrasser les faits si compliqués de la vie; mais les phénomènes purement physiques et chimiques de la lumière embrassent un champ assez étendu déjà, pour que nous ne puissions ici qu'en indiquer les divisions principales, en nous restreignant même aux faits les plus élémentaires.

Corps lumineux
par
eux-mêmes.

368. Les corps célestes seuls sont habituellement lumineux par eux-mêmes; tous les corps de la nature cependant peuvent le devenir dans des conditions déterminées. Une élévation de température suffisante produit cet effet, § 139. Cette espèce de transformation de chaleur en lumière laisse apercevoir entre ces deux agents des analogies remarquables que nous verrons se multiplier dans le cours du livre suivant, livre VIII, et qui très-probablement nous sembleraient plus grandes encore si nous connaissions bien de quelle manière agit la lumière sur nos yeux. Parmi l'immense quantité de sons lumineux, si cette expression nous est permise, qui émanent à un moment donné d'une source de lumière, un nombre restreint est perceptible par nos yeux; notre échelle optique n'embrasse pas même une octave. En deçà et au-delà existent des mouvements vibratoires qui, invisibles pour nous, peuvent être perçus par d'autres êtres, ou donner naissance à des phénomènes divers. Une étude des rayons

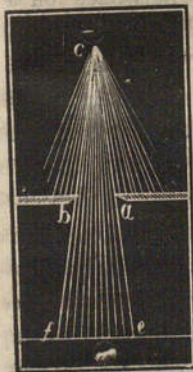
lumineux qui n'aurait que notre œil pour instrument serait donc essentiellement incomplète.

Nous diviserons l'optique en deux parties : dans la première, livre VII, nous étudierons les phénomènes généraux et élémentaires de la propagation de la lumière ; dans la seconde, livre VIII, nous passerons sommairement en revue les propriétés du rayonnement lumineux et des rayonnements concomitants.

369. La lumière se transmet en ligne droite dans un milieu homogène : chacun a vu, en effet, des rayons solaires pénétrer dans l'intérieur d'un appartement, par d'étroites ouvertures des volets, ou s'introduire, au travers du feuillage, au milieu de l'ombre épaisse des bosquets ou des bois. Les grains de poussière des corpuscules, vivement éclairés sur sa route, nous en font apparaître une trace brillante parfaitement rectiligne. Dans ce cas, le faisceau lumineux est cylindrique, tous les rayons élémentaires qui le composent sont parallèles : ce phénomène est dû à l'immense distance de la terre au soleil. D'une manière générale, l'onde lumineuse se propage dans un milieu homogène, comme l'onde sonore, sphériquement autour de

La lumière
se propage
en ligne droite.

Fig. 226.

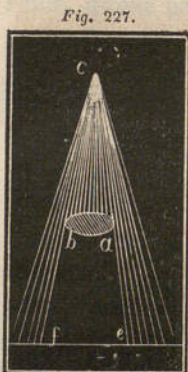


son point de départ; et si à une certaine distance de son origine c nous l'interceptons dans toute son étendue à l'exception d'une certaine portion ab , cette portion continuera à se propager en restant concentrique au point c , et à peu près exactement renfermée entre les lignes ca et cb . Le rayon est donc divergent dans ce cas, d'autant plus que la distance ca est plus courte. Une onde sonore ne resterait pas aussi exactement délimitée que le fait l'onde lumineuse; elle s'épanouirait dans

Ondes
lumineuses.

Ombres.

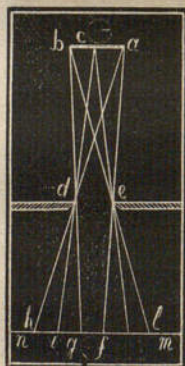
tous les sens, tout en restant plus intense dans la direction primitive. Un effet analogue est, à la vérité, produit par la lumière, mais dans des limites si restreintes, qu'il nous faut opérer dans des conditions particulières pour nous en convaincre.



Si, au lieu d'intercepter l'onde lumineuse par un écran indéfini percé d'une ouverture, nous plaçons sur sa route un corps opaque défini *b a*, un effet analogue se produira, mais en sens inverse; l'espace *a e b f* restera dans l'ombre, tandis que l'onde lumineuse se propagera tout autour. Celle-ci empiètera bien un peu sur l'espace conique qu'elle embrasse à mesure qu'elle s'éloignera de l'obstacle *a b*, mais elle le fera d'une manière peu sensible; le son, au contraire, y pénétrerait beaucoup plus rapidement.

370. Dans les circonstances ordinaires, la source lumineuse n'est pas formée par un point unique comme nous

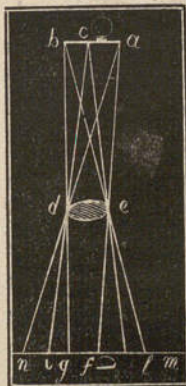
venons de le supposer; elle a une étendue plus ou moins considérable. Chaque point lumineux donne naissance ou à un cône lumineux, *fig. 226*, ou à un cône d'ombre, *fig. 227*; et comme ils ne se superposent pas exactement, leurs limites n'en sont plus aussi tranchées. Un corps lumineux étendu *a b* est situé au-devant d'un écran percé d'une ouverture en *e d*. Si nous construisons les cônes lumineux extrêmes, nous voyons que toute la portion *h* de l'écran *m n* située derrière l'ouverture recevra de la lumière, mais en quantités très-inégales. *f g* recevra des rayons de tous les



Ombres
et pénombres.

points du corps lumineux ab ; le point i , au contraire, n'en recevra plus que de la portion ca , et celle-ci diminuant

Fig. 229.



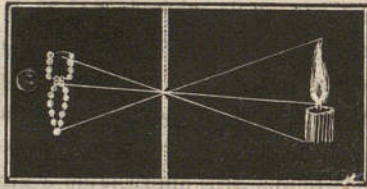
de plus en plus à mesure que nous irons de g en h ou de f en l , nous aurons en fg un éclaircissement complet environné d'un espace de moins en moins éclairé à mesure que nous nous approcherons de l'ombre. L'espace gh ou fl s'appelle pénombre. Effet analogue, mais inverse si nous interposons un corps ed sur le trajet des rayons lumineux : en fg , nous aurons une ombre complète; de g en h et de f en l , une pénombre de plus en plus éclairée en allant de g en h ou de f en l . La pénombre va

toujours en grandissant à mesure que l'on s'éloigne de l'obstacle à la propagation de la lumière; c'est un fait que chacun de nous est journellement à même de vérifier. L'ombre augmente également d'étendue en arrière du corps qui la projette, si ce corps est plus grand que la source de lumière; elle se rétrécit et se termine, au contraire, quand le corps opaque est plus petit que le corps lumineux, ainsi qu'il arrive du soleil et des planètes.

371. Lorsque nous examinons la projection sur le sol des rayons solaires qui ont pénétré au travers des interstices des arbres, nous la trouvons toujours arrondie, bien que ces intervalles aient les formes les plus variées et les plus irrégulières. Cette apparence est due à la même cause, la superposition des faisceaux lumineux qui partent des divers points du soleil. Chaque point du soleil est représenté sur le sol par une image de l'ouverture par laquelle pénétrèrent les rayons; et si cette ouverture est petite, on a une image un peu confuse mais reconnaissable du corps

Images des corps lumineux.

Fig. 230.



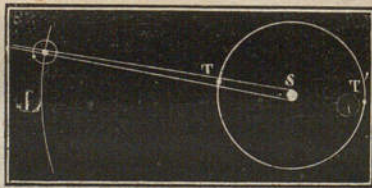
lumineux. Pendant une éclipse partielle du soleil, tous ces ronds allongés par suite de l'inclinaison des rayons sur le sol, s'échangent comme le disque apparent du soleil lui-même.

Présentons devant une bougie une carte noire percée d'un trou d'épingle, nous aurons derrière une image renversée de la flamme, très-reconnaissable quoiqu'elle ne soit pas parfaitement nette. C'est ainsi que l'image des objets extérieurs vient se peindre au fond d'une chambre dont on a exactement fermé les volets en n'y laissant qu'une petite ouverture par laquelle les rayons extérieurs puissent pénétrer.

Vitesse
de propagation
de la lumière.

372. La lumière se propage avec une prodigieuse vitesse

Fig. 231.



déterminée, en 1676, par Roemer, à l'aide des considérations suivantes :

Autour du soleil, centre de notre système planétaire, tournent di-

verses planètes parmi lesquelles se trouvent la terre et Jupiter. Autour de Jupiter tournent à leur tour plusieurs satellites ou lunes, dont la plus rapprochée exécute sa révolution complète en $42^{\text{h}}, 29'$. Toutes les $42^{\text{h}}, 29'$, ce satellite pénètre dans l'ombre projetée par Jupiter, et disparaît à nos yeux. Supposons qu'au 1^{er} Mars, à minuit précis, une immersion ait lieu, et laissons marcher les phénomènes. La 102^{me} immersion aura lieu au bout d'un temps égal à $42^{\text{h}}, 29' \times 102$, ce qui équivaut à 180 jours $13^{\text{h}}, 18'$. Mais au bout de ce temps, c'est-à-dire le 26 Août à $1^{\text{h}}, 18'$ du

soir, la terre qui était en T se sera transportée en T'. Cette translation n'influera en rien sur le phénomène, si la lumière se propage avec une vitesse infinie; mais si, bien que très-grande, cette vitesse est finie, l'immersion qui sera visible en T le 26 Août à 1^h,18' du soir, le sera en T' plus tard, de tout le temps employé par la lumière pour passer de T en T'. Or, ce temps très-appreciable a été trouvé de 16',26" environ, ce qui donne pour la lumière une vitesse de 80,000 lieues par seconde, ou une vitesse 400,000 fois plus grande que celle d'un boulet de canon. La lumière met environ 8',13" pour arriver du soleil à la terre; elle met plus de trois ans pour parcourir l'espace qui nous sépare de l'étoile la plus rapprochée de nous.

Cette vitesse de la lumière est, au reste, variable avec la nature des milieux dans lesquels elle se propage. Contrairement à ce qui se passe pour le son, la vitesse de la lumière est généralement d'autant plus faible que le milieu est plus dense.

CHAPITRE II.

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE.

373. La régularité avec laquelle se propage la lumière dans un milieu homogène, disparaît à la surface de séparation de deux milieux de natures ou de propriétés différentes. Une partie de la lumière déviée de sa direction primitive pénètre dans le nouveau milieu à des profondeurs variables; suivant la nature de ce milieu et la nature de la lumière; l'autre partie revient sur ses pas: on dit qu'elle est *réfléchie*.

Réflexion
de la lumière.

374. La réflexion de la lumière s'effectue de deux manières à la surface des corps: régulièrement et irrégulièrement. Un petit nombre de corps sont lumineux par eux-

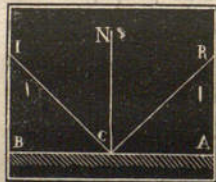
Réflexion diffuse.

mêmes; mais tous peuvent le devenir quand ils sont convenablement éclairés. Une partie de la lumière qui vient les frapper est pour ainsi dire réfléchiée à leur surface, et, après avoir été plus ou moins modifiée et colorée par elle, est disséminée dans tous les sens. C'est cette lumière ainsi diffusée qui nous rend visibles les corps. Elle est plus ou moins abondante, suivant leur nature, et surtout suivant l'état de leur surface.

Réflexion régulière.

375. Outre cette espèce de réflexion diffuse, une réflexion plus régulière s'effectue à la surface des corps doués d'un certain degré de poli; elle a lieu, en effet, pour chaque rayon dans une direction unique, déterminée par l'inclinaison du rayon sur la surface au point où il la rencontre.

Fig. 232.

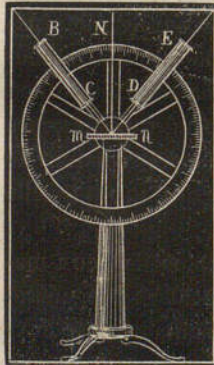


Lois de la réflexion régulière.

Soit AB une surface polie, plane ou courbe, IC un rayon incident en C, CN la normale à la surface en ce même point : la position du rayon réfléchi sera déterminée par les deux lois suivantes.

1° Le rayon incident IC, le rayon réfléchi CR et la normale CN sont tous les trois compris dans un même plan.

Fig. 233.



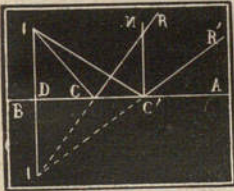
2° L'angle d'incidence ICN et l'angle de réflexion NCR sont égaux entre eux.

Ces deux lois peuvent être démontrées approximativement à l'aide de l'appareil suivant : sur un cercle gradué est fixé un miroir $m\ n$ dont la surface, passant par le centre du cercle, est perpendiculaire à son plan. Autour du centre du même cercle tournent deux alidades portant des tubes métalliques fermés aux deux bouts d'ou-

vertures étroites concentriques avec l'axe des tubes. Nous exposons cet appareil aux rayons solaires, de manière que le plan du limbe soit parallèle à ces rayons, et nous inclinons l'un des tubes B jusqu'à ce qu'un faisceau de rayons solaires le traverse dans la direction même de son axe. Pour que les rayons solaires, après leur réflexion sur le miroir, puissent passer dans l'axe du second tube C D, il suffira d'incliner ce tube de manière qu'il fasse avec la normale A N au miroir un angle E A N égal à l'angle N A B. La réflexion n'a pas fait sortir le rayon du plan du cercle gradué.

Les lois de la réflexion de la lumière nous fourniront une

Fig. 234.



explication facile des effets produits par les surfaces polies courbes ou planes.

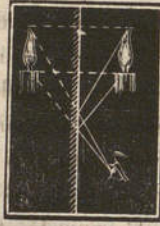
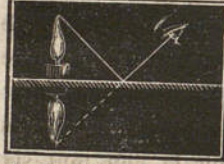
376. Un point I envoie des rayons lumineux I C, I C' à la surface d'un miroir plan A B. Pour construire les rayons réfléchis correspondants, abaissons I D perpendiculaire sur A B, et prolongeons-la d'une quantité D I' = I D. Le point I' sera *symétrique* du point I. Menons I' C R, I' C' R', les lignes C R, C' R', seront des rayons réfléchis, ainsi qu'on peut l'induire de l'égalité des triangles rectangles I D C et I' D C....

Miroirs plans.

Les rayons réfléchis à la surface d'un miroir plan semblent donc partir d'un point situé derrière le miroir, symétriquement au point d'où ils émanent réellement; et l'œil qui les recevra sera impressionné par eux exactement comme si le point I' existait. I' est dit l'image du point I.

Au lieu d'un simple point lumineux, plaçons un objet devant un miroir plan, chaque point de l'objet aura son image symétriquement placée derrière le miroir où nous verrons une représentation fidèle mais symétrique de cet

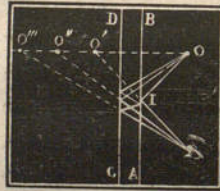
Images fournies
par les
miroirs plans.



objet. Elle sera donc tantôt renversée, *fig. 235*, tantôt droite mais le côté gauche transporté à droite ou inversement, *fig. 236*, tantôt horizontale, l'objet étant vertical, *fig. 237*.

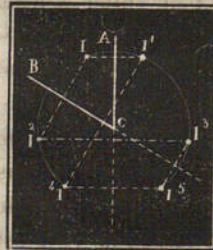
La proximité de deux miroirs plans parallèles ou inclinés l'un sur l'autre, peut donner lieu à des effets intéressants. Lorsque l'on regarde très-obliquement par réflexion l'image

Réflexions
multiples.



d'une bougie dans une glace étamée, on la voit accompagnée de cinq ou six autres images plus pâles, l'une antérieure et les autres postérieures, et de plus en plus éloignées. La première image O' est due à la réflexion des rayons sur la première surface AB du miroir; la seconde, la plus intense, à la réflexion des rayons sur la seconde surface, la surface étamée CD ; la troisième et les suivantes à des réflexions multiples et alternatives sur ces deux faces.

Kaléidoscope.

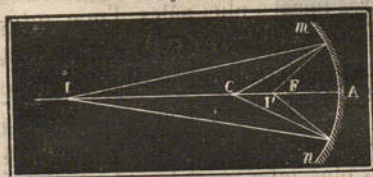


C'est à des réflexions successives semblables qu'il faut attribuer ces galeries indéfinies que l'on aperçoit lorsque deux glaces sont parallèles et opposées dans un appartement. C'est à la même cause que sont dus les effets du *kaléidoscope*. Deux miroirs AC et CB sont inclinés l'un sur l'autre de

60° ou du sixième de la circonférence ; un point I est situé entre eux. Les rayons qui émanent de ce point se réfléchiront une première fois sur le miroir AC , et formeront une image symétrique I' ; ils se réfléchiront une seconde fois sur CB où ils formeront une image I^1 symétrique de I' , puis une troisième fois sur CA où ils formeront I^2 symétrique de I^1 . En partant de CB au lieu de CA , nous aurons semblablement I^3 , puis I^4 , puis I^5 , en tout six images symétriquement groupées autour de C , en y comprenant l'objet lui-même.

377. Les lois de Descartes, § 375, sont également applicables aux surfaces concaves ou convexes des miroirs sphériques ; mais la position, la forme et la grandeur des images, sont modifiées par la courbure de la surface réfléchissante.

Fig. 240.



Soit mn un miroir concave, C le centre de la sphère sur laquelle il a été travaillé, et A le centre du miroir lui-même. Menons la ligne AC appelée *axe principal du miroir*. Imaginons maintenant qu'un point lumineux soit placé en I sur l'axe principal. Un rayon IB partant de ce point et tombant en B sur le miroir, formera avec la normale BC un angle IBC dont le plan contiendra l'axe principal tout entier : c'est dans ce plan que s'effectuera la réflexion. Le rayon réfléchi viendra donc couper l'axe en un certain point I' situé entre C et A .

Or, si le miroir a été bien travaillé, s'il a peu d'étendue par rapport à la longueur de son rayon CA ou CB , tous les rayons qui, partant du point I seront réfléchis par le miroir, viendront, après leur réflexion, passer en I' . I' est

Miroirs courbes.

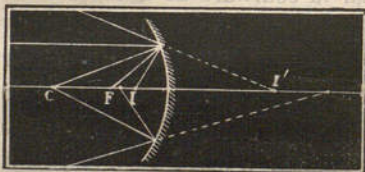
Foyers conjugués.

dit le foyer conjugué du point I. Si, en effet, le point lumineux était transporté en I', son foyer passerait en I. A mesure que le point I se rapproche de C, l'angle IBC diminue, l'angle I'BC doit donc aussi diminuer : le point I' se rapproche du point C. Un effet semblable mais inverse a lieu quand le point I s'éloigne. A une distance infinie de ce point, lorsque les rayons qu'il envoie sur le miroir sont parallèles comme les rayons solaires, le point I' est situé à égale distance des points A et C en un point F appelé le *foyer principal* du miroir.

Foyer principal.

L'image d'un point lumineux situé sur l'axe principal en dehors du centre est donc toujours comprise entre les limites C et F, *fig. 240*. L'image d'un point lumineux

Fig. 241.



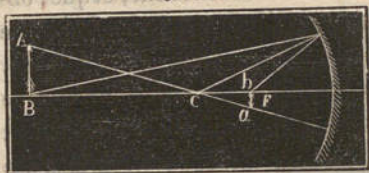
compris entre C et F, et marchant de C en F, est située sur l'axe principal en dehors du centre, et s'éloigne depuis C jusqu'à l'infini.

Si le point lumineux dépasse le foyer principal en se rapprochant du miroir, les rayons réfléchis divergent et ne donnent plus de foyer conjugué réel; mais si nous prolongeons ces rayons au-delà du miroir, ils viendront encore converger en un point I' de l'axe principal appelé foyer virtuel. Ce foyer n'existe pas réellement; mais les rayons réfléchis étant dirigés comme s'ils en émanaient, affecteront l'œil exactement comme s'ils le faisaient réellement. Nous verrons en I' l'image du point I.

Tout ce que nous venons de dire sur l'axe principal s'applique exactement aux axes secondaires, lignes qui ont pour seule condition de passer par le centre C.

378. Les considérations qui précèdent étant bien comprises, rien n'est plus simple que l'intelligence des effets

Fig. 242.



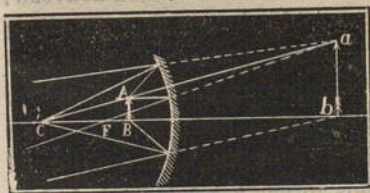
produits par les miroirs concaves et convexes.

Un objet AB est placé devant un miroir concave. Le point B situé sur l'axe enverra sur le miroir des rayons qui, après leur réflexion, viendront se croiser en b . L'œil qui recevra ces rayons en sera impressionné comme si b était un point lumineux : B aura son image en b . A aura également son image en a sur l'axe secondaire ACa ; de même pour les points intermédiaires. En ab , nous aurons donc une image exacte de AB , mais renversée et plus petite. Réciproquement AB pourrait être une image renversée, mais agrandie d'un objet ab placé en a . Plaçons-nous devant un miroir concave appelé œil-de-bœuf, à une distance assez grande, nous apercevrons notre figure en miniature et renversée. Quand AB s'approche de C , ab s'en rapproche aussi en s'agrandissant. En C l'image et l'objet sont dans le même plan et d'égale grandeur.

Images produites par les miroirs concaves.

Image réelle.

Fig. 243.

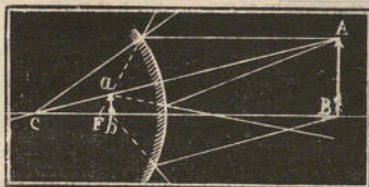


L'objet passe-t-il entre le foyer principal et le miroir, son image réelle disparaît pour faire place à une image virtuelle droite et agrandie. L'objet est en AB ; le point B a son image virtuelle en b . Le point A a son image virtuelle en a sur l'axe secondaire AC . Un œil-de-bœuf nous montre notre figure droite et agrandie d'autant plus que nous nous éloignons davantage du miroir pour nous rapprocher du foyer principal F .

Image virtuelle.

379. Supposons maintenant que notre miroir soit poli sur

Miroirs
convexes.
Images
virtuelles.



sa convexité, et que l'objet AB prenne la place de l'image virtuelle ab . Nous aurons une image droite mais plus petite, située en ab à la place de AB . La marche de la lumière est inverse, mais elle s'effectue dans des directions identiques.

Les effets produits par les miroirs dont les surfaces ont d'autres formes, s'expliquent d'après les mêmes lois. Il est inutile de nous en occuper ici.

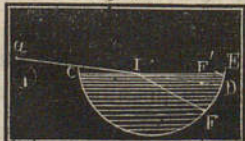
Plusieurs instruments d'optique sont fondés sur les lois de la réflexion de la lumière : tels sont les télescopes, les goniomètres de Charles et de Wollaston, et l'héliostat.

CHAPITRE III.

PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX DE RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE.

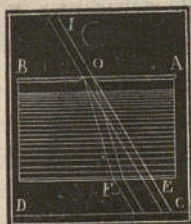
380. La lumière, en pénétrant dans un milieu nouveau, éprouve des modifications variables dans sa nature et dans la direction suivant laquelle elle se propage. C'est de cette dernière que nous nous occuperons dans ce chapitre.

Plongeons un bâton dans l'eau, il nous paraîtra brisé à la surface de ce liquide. Regardons un verre dans lequel nous aurons versé de l'eau, le fond vu au travers du liquide nous paraîtra soulevé, d'autant plus que nous le regarderons plus obliquement. Opérons autrement; prenons un vase à parois opaques, plaçons au fond un objet coloré F ,



et éloignons-nous à une distance convenable, en *a* par exemple. Toute la paroi intérieure DFC sera invisible à nos yeux ; mais si nous versons de l'eau dans notre vase, des parties cachées nous apparaîtront , et l'objet F deviendra visible pour nous sans que nous ayons changé de position.

Fig. 246.



381. L'expérience suivante peut nous donner une idée du phénomène qui se produit dans ces diverses circonstances. Une caisse rectangulaire ABCD en verre est fermée supérieurement par un couvercle percé d'une ouverture *o*, et est placée à une petite distance au-dessus d'une table peinte en blanc CD. La

Réfractions
des rayons
lumineux.

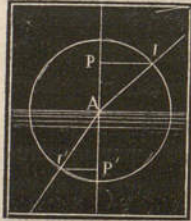
caisse étant vide d'abord, nous y faisons pénétrer, par l'ouverture *o*, un faisceau de rayons I qui la traverseront sans déviation, et viendront se projeter en E sur la table. Nous remplissons alors notre caisse d'une eau légèrement laiteuse; nous voyons la trace du faisceau lumineux se déplacer à mesure que la caisse se remplit, et se transporter en F. Nous constatons en même temps :

- 1° Que la lumière se propage en ligne droite au sein de l'eau comme dans l'air et dans le vide ;
- 2° Que sa direction dans l'eau fait un angle très-appreciable avec sa direction dans l'air ;
- 3° Que l'inflexion ou la *réfraction* de la lumière a lieu à la surface de séparation de l'eau et de l'air ;
- 4° Qu'en passant de l'air dans l'eau, la lumière se rapproche de la normale à la surface réfringente au point d'incidence ;
- 5° Que l'angle formé par le rayon incident II' et par le rayon réfracté IF, est d'autant plus grand que l'inclinaison du rayon incident sur la surface est plus grande elle-même ;
- 6° Qu'en repassant de l'eau dans l'air, la lumière se ré-

fracte de nouveau, mais en sens inverse et d'une quantité précisément égale à celle dont elle s'était réfractée en pénétrant dans l'eau, pourvu que les deux surfaces d'entrée et de sortie soient parallèles.

Lois
de la
réfraction.

Fig. 247.



382. Les lois de la réfraction sont analogues aux lois de la réflexion.

Soit BC la surface de séparation de deux milieux de nature ou de propriétés distinctes, IA un rayon incident sur cette surface, AI le rayon réfracté, PAP' la normale à la surface au point d'incidence.

1° Le rayon incident, le rayon réfracté et la normale, seront tous les trois compris dans un même plan normal à la surface réfringente en A .

2° Si du point A comme centre nous décrivons avec un rayon égal à l'unité un cercle qui coupe nos deux rayons en I et I' , et que de ces points nous abaissions des perpendiculaires IP et $I'P'$ sur la normale, ces perpendiculaires, appelées sinus, seront entre elles dans un rapport constant, quel que soit l'angle PAI . Les sinus d'incidence et de réfraction sont dans un rapport constant.

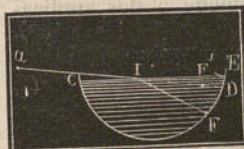
3° La marche des rayons est réciproque : c'est-à-dire que si AI est le rayon réfracté de IA , AI serait aussi le rayon réfracté de $I'A$.

4° Un rayon qui tombe normalement à la surface d'un corps n'y subit aucune déviation.

Ces lois ne sont pas sans exceptions. Elles se vérifient toujours quand le milieu réfringent est amorphe comme l'eau, le verre et les cristaux cubiques; mais elles se compliquent dans les autres. Elles nous fourniront toutefois une explication simple des faits que nous avons rappelés au commencement de ce livre.

383. Un corps F est situé au fond de l'eau ; le rayon $F I$ qui en émane arrivant à la surface de l'eau pour pénétrer

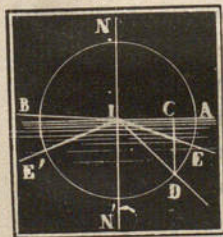
Fig. 248.



dans l'air, s'écarte de la normale, et, suivant la direction $I a$, peut arriver jusqu'à l'œil par-dessus le rebord c du vase. Mais l'impression que produit ce rayon sur l'œil ne dépend que de sa direction finale et non de ses directions antérieures : c'est donc sur le prolongement de $a I$ en F' que nous verrons l'objet qui nous semblera ainsi relevé. Même effet sera produit sur un bâton plongeant dans l'eau ; chacune des parties immergées étant relevée d'une quantité d'autant plus grande qu'elle est plus profondément située dans l'eau, le phénomène aura l'aspect que nous avons indiqué, et que chacun connaît.

384. Les lois de la réfraction nous conduisent à un autre résultat remarquable.

Fig. 249.



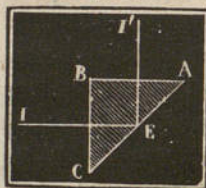
Quand la lumière passe de l'air dans l'eau, l'indice de réfraction est égal à $\frac{4}{3}$. Du point I d'incidence de divers rayons à la surface de l'eau, décrivons un cercle qui rencontre cette surface en A et B , partageons la ligne IA en 4 parties égales ; de la troisième division c , abaissons la normale CD , et menons ID . Un rayon BI tombant en I parallèlement à la surface de l'eau se propagera dans ce liquide suivant ID , et tout rayon compris dans l'angle $NI B$ aura un rayon réfracté compris dans l'angle $D I N'$. Réciproquement, tout rayon incident compris dans l'angle $D I N'$ aura un rayon réfracté compris dans l'angle $NI B$; mais le rayon FI situé en dehors de l'angle $D I N'$ n'aura plus de rayon ré-

Explication
des
déplacements
produits
par les
réfractions.

Réflexion
totale.

fracté correspondant. L'expérience démontre, en effet, que ce rayon n'émerge pas, et qu'il se réfléchit totalement à la surface de l'eau. L'angle DIN' est appelé *angle limite*.

Fig. 250.



385. Ce phénomène a des applications nombreuses en physique, et il nous permet de construire avec du verre seul des miroirs beaucoup plus parfaits que les miroirs métalliques: soit ABC un prisme de verre rectangulaire en B. Un rayon ID tombe perpendiculairement sur la face BC et n'y subit aucune déviation; il arrive en E, rencontre la surface AC sous un angle plus grand que l'angle limite, y éprouve une réflexion totale, et ressort par AB sans déviation nouvelle.

C'est encore au phénomène de la réflexion totale qu'il faut rattacher le mirage.

L'air atmosphérique agit sur la lumière, comme les corps solides et liquides, avec une intensité faible, il est vrai, mais croissant avec sa densité. Lors donc que la lumière des astres pénètre au sein de l'air pour arriver jusqu'à nous, elle y éprouve une série continue de réfractions qui l'infléchissent vers la terre; et comme nous apercevons nécessairement les objets dans la direction qu'ont leurs rayons lumineux au moment où ils arrivent à notre œil, ces astres nous paraissent relevés au-dessus de leur position réelle. La réfraction astronomique est nulle au zénith et dans les points voisins; elle devient sensible et croît même rapidement près de l'horizon. Aussi voit-on les parties inférieures du disque de la lune et du soleil plus fortement relevées au-dessus de leur position réelle que les parties supérieures, et ces disques, ordinairement ronds, nous paraître aplatis vers l'horizon.

Des effets analogues se produisent journellement à la

Réfractions
astronomiques.

Réfractions
des objets
terrestres.

surface du sol, par suite des variations apportées dans le pouvoir réfringent de l'air par les variations de température qu'il subit. Chacun sait combien les objets nous paraissent tremblotants quand les rayons lumineux qui nous les font voir ont passé près d'un corps chaud. Pendant les diverses périodes du jour, le sol s'échauffe et se refroidit plus rapidement que l'air; les couches d'air qui sont en contact avec lui participant de sa température, sont donc tantôt plus chaudes, tantôt plus froides que les couches supérieures, et il en résulte souvent des effets singuliers. Plaçons-nous à l'extrémité d'une longue plaine à l'autre bout de laquelle se trouve un clocher, par exemple: le matin, après une nuit bien pure, la plaine nous semblera concave, et le clocher situé sur une hauteur; dans le jour, au contraire, lorsque le sol aura été échauffé par les rayons solaires, la plaine deviendra convexe, et nous ne verrons plus que les parties supérieures du clocher.

Ce phénomène acquiert surtout une intensité remarquable dans les plaines sablonneuses et brûlantes de l'Afrique et de l'Asie. Non-seulement les rayons lumineux sont réfractés par les couches d'air voisines du sol, mais ils y éprouvent souvent une réflexion totale qui donne naissance à une seconde image des objets d'où ils émanent. Ce phénomène, appelé mirage, est très-fréquent dans les déserts de la Basse-Égypte, et a été souvent la cause d'erreurs funestes pour nos soldats qui, voyant l'image des nuages réfléchie sur le sol, attribuaient ce phénomène à des eaux imaginaires. On a observé quelquefois des effets de mirage s'effectuer sur le bord de la mer, par un temps calme et chaud, mais sur un plan vertical. Ces effets sont plus rares et de moins longue durée.

Mirage.

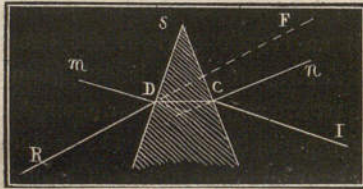
CHAPITRE IV.

DES PRISMES ET LENTILLES.

386. La théorie du plus grand nombre des instruments d'optique repose sur les lois de la réfraction de la lumière.

Fig. 251.

Prismes.



Prenons un prisme de verre asb , et regardons un objet quelconque au travers de ce prisme. L'objet nous paraîtra relevé vers le sommet s d'une quantité en gé-

néral considérable. Il sera en même temps coloré sur les bords; mais ce dernier phénomène fera l'objet d'une discussion à part : occupons-nous seulement de la déviation de la lumière.

Déviation
des rayons
par le prisme.

Un faisceau de rayons solaires tombe en C sur la surface as . En pénétrant dans le milieu transparent, il se brise en C et se rapproche de la normale suivant CD . Arrivé en D à la seconde surface, il émerge du prisme, mais en subissant une nouvelle réfraction qui cette fois l'éloigne de la normale Dm suivant DR . Ces deux réfractions s'ajoutent, comme on voit, dans le cas particulier que nous avons représenté. Quelquefois, au contraire, elles ont lieu en sens inverse, et se retranchent; mais le résultat final est toujours le même : le faisceau est dévié de sa direction primitive et rejeté vers la base du prisme. Les objets vus au travers du prisme paraîtront donc, au contraire, transportés vers son sommet.

387. L'angle dont les rayons lumineux sont déviés par un prisme dépend de la grandeur de l'angle réfringent s

du prisme; de l'action exercée sur la lumière par la substance dont il est formé, ou de son pouvoir réfringent; enfin, de la position du prisme par rapport aux rayons qui le traversent. Observons un objet au travers d'un prisme que nous ferons tourner sur son axe : la déviation de l'objet décroîtra d'abord, atteindra un *minimum* au-delà duquel nous la verrons de nouveau grandir. Cette position remarquable du prisme, qui correspond à la déviation minimum, a lieu lorsque l'angle d'incidence à la première surface est égal à l'angle d'émergence à la seconde; d'où il résulte évidemment que les rayons lumineux, dans l'intérieur du prisme, sont également inclinés sur les deux faces, *fig.* 251. L'angle de réfraction en C est alors égal à la moitié de l'angle réfringent s du prisme, et l'angle d'incidence ICn égal à la moitié de cet angle augmenté de la moitié de l'angle de déviation totale du rayon R.

Déviation
minimum.

388. Supposons donc que nous ayons à mesurer l'indice de réfraction d'une substance, du verre, par exemple : nous en formerons un prisme dont nous mesurerons l'angle de réfringence S , nous ferons tomber sur ce prisme dans sa position de déviation minimum un faisceau de rayons parallèles dont nous mesurerons la déviation d ; les angles d'incidence et de réfraction seront $\frac{1}{2}(S+d)$ et $\frac{1}{2}S$. L'indice de réfraction sera donc égal à $\frac{\text{Sin } \frac{1}{2}(S+d)}{\text{Sin } \frac{1}{2}S}$.

Mesure
de l'indice
de réfraction.

Pour mesurer l'indice de réfraction des liquides, il nous suffira de les renfermer dans un prisme creux formé par deux glaces de verre à parois bien parallèles, et d'opérer comme sur un prisme solide : il en est de même pour les gaz. Nous ferons observer ici toutefois que ces déterminations exigent des précautions nombreuses qu'il nous est impossible d'indiquer ici. Nous donnons plus bas les indices de réfraction de quelques substances les plus usuelles.

Corps solides et liquides.

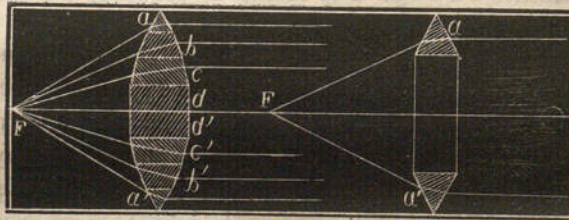
Chromate de plomb..	2,974	Sel gemme.....	1,545
Diamant.....	2,755	Cristallin	1,384
Phosphore.....	2,224	Humeur vitrée	1,339
Soufre.....	2,148	Humeur aqueuse....	1,337
Verre commun	1,550	Eau.....	1,336
Flintglas.....	1,576	Alcool.....	1,374
Crownlass	1,534	Ether	1,358

Corps gazeux à 0° et sous la pression 760mm.

Air atmosphérique.	1,000294	Azote	1,000300
Oxygène.....	1,000272	Acide carbonique.	1,000449
Hydrogène.....	1,000138	Acide chlorhydre.	1,000449
Chlore.....	1,000772	Ammoniaque....	1,000385

Fig. 252.

253.



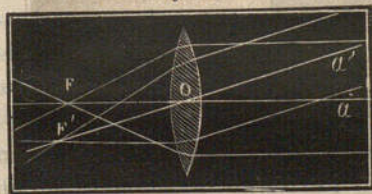
Lentilles.

389. Imaginons maintenant que nous recourbions en anneau un prisme aa' , fig. 253, et que nous fassions tomber sur lui un faisceau de rayons parallèles; les rayons qui le traverseront seront réfractés uniformément, et viendront se croiser en un point F situé sur l'axe de notre anneau. Groupons une série d'anneaux prismatiques semblables, dont l'angle réfringent aille en augmentant depuis l'anneau central et plein dd' où il est nul, jusqu'au dernier aa' où il est le plus grand, fig. 252; chaque anneau concentrera la lumière en un point de l'axe commun, depuis le premier dd' où la déviation sera nulle jusqu'au dernier aa' où elle sera maximum. On

conçoit facilement que nous pourrions graduer nos prismes de manière que tous les rayons réfractés viennent converger en un même point, et que ce résultat devra être obtenu d'une manière plus complète encore si nous multiplions indéfiniment le nombre des anneaux compris entre a et b , de manière que leur ensemble soit terminé, non plus par une surface polyédrique, mais par une surface courbe. Ces conditions sont réalisées par les lentilles, masses de verre terminées par des surfaces sphériques.

390. Prenons une semblable lentille, exposons-la aux rayons solaires, et plaçons derrière elle, à une distance variable, un écran en papier blanc. Les rayons qui auront traversé la lentille dessineront sur l'écran un cercle blanc brillant qui ira en se rétrécissant de plus en plus jusqu'à un certain point appelé *foyer principal*, que l'on retrouve de chaque côté et à égale distance de la lentille, et à partir duquel le cercle croîtra, au contraire, indéfiniment.

Fig. 254.



le premier cas, le point de convergence des rayons est situé sur l'*axe principal* de la lentille, ligne qui passe par les centres des sphères auxquelles appartiennent ses deux surfaces; dans le second, elle a lieu sur une ligne appelée *axe secondaire*, et qui, parallèle aux rayons incidents, passe par un point O appelé *centre optique* de la lentille. La distance OF est la *distance focale principale*.

391. Un résultat analogue aurait lieu si les rayons lumineux, au lieu d'être parallèles, émanaient d'un point situé

Lentilles convergentes.

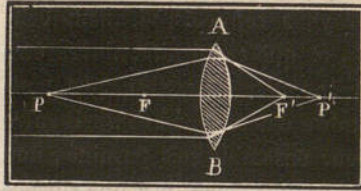
Foyer principal.

Axe principal.

Axe secondaire.

Distance focale principale.

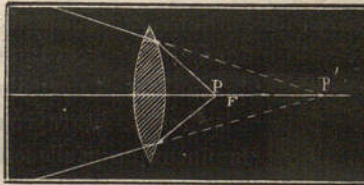
Fig. 255.



Foyer conjugué.

à une distance quelconque de la lentille. Soit AB une lentille dont les deux foyers principaux sont en F et F' , sur l'axe principal, et P un point lumineux situé sur ce même axe au-delà du foyer F . Les rayons qui, partant du point P , tomberont sur la lentille, viendront converger en un point P' également situé sur l'axe au-delà du foyer F' et appelé *foyer conjugué* du point P , parce que, si le point lumineux était en P' , son foyer serait en P . Si l'on fait marcher le point lumineux depuis l'infini jusqu'en F , son foyer conjugué s'éloignera de F' jusqu'à l'infini. Si le point lumineux dépassait le point F et pénétrait entre la len-

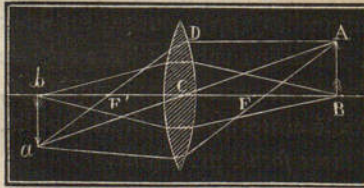
Fig. 256.



Foyer virtuel.

tille et son foyer principal, la convergence des rayons n'aurait plus lieu; mais en prolongeant ces rayons suffisamment du côté du point lumineux, on verrait qu'ils passent encore par un point P' de l'axe, *foyer virtuel* du point P . Ces rayons émergents affecteraient l'œil exactement comme s'ils provenaient du point P' .

Fig. 257.

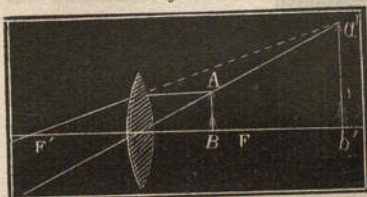


Images
des objets
formés
par
les lentilles
convergentes.

392. Au lieu d'un point, plaçons un corps lumineux AB au-devant d'une lentille, en dehors de son foyer principal; menons par le centre optique C l'axe secondaire correspondant au point A , et construisons le rayon

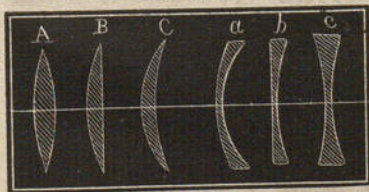
AD parallèle à l'axe principal; ce rayon, après sa réfraction, passera par le foyer principal F' . Le point a où il rencontrera l'axe secondaire sera le foyer conjugué du point A. Le point b sera de même le foyer conjugué de B, et ba l'image de AB. Cette image sera toujours renversée tant qu'elle sera réelle; quant à sa grandeur, elle sera variable. AB et ab sous-tendent, en effet, le même angle; leurs dimensions relatives seront donc les mêmes que leurs distances à la lentille. Plus l'objet s'approchera du foyer F ,

Fig. 258.



plus l'image s'éloignera du foyer F' , et s'agrandira. Répétons la même construction en supposant l'objet AB placé entre la lentille et son foyer principal. L'image réelle ab n'existera plus et sera remplacée par une image virtuelle $a'b'$; en regardant AB au travers de la lentille, nous le croirons transporté en $a'b'$. Cette image virtuelle $a'b'$ sera toujours droite et agrandie; infiniment grande et infiniment éloignée quand l'objet est en F , elle se rapproche et s'amointrit quand AB se rapproche lui-même de la lentille. C'est dans ces conditions qu'on emploie les loupes.

Fig. 259.



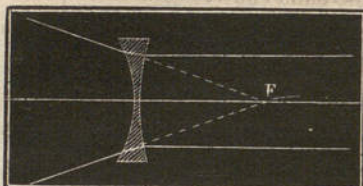
393. Nous n'avons considéré jusqu'à présent que des lentilles bi-convexes; nous en avons représenté, figure 259, de trois espèces ABC qui toutes jouissent des mêmes propriétés: elles sont convergentes. Les lentilles abc sont, au contraire, divergentes: elles ne donnent jamais d'images réelles des corps.

Images réelles
et renversées.

Images
virtuelles
et droites.

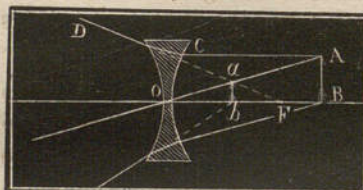
Lentilles
divergentes.

Fig. 260.



Quand un faisceau de rayons parallèles tombe sur une lentille de la seconde espèce, les rayons réfractés divergent, mais leur prolongement vient passer par un point F appelé encore foyer principal de la lentille. Ce foyer est virtuel.

Fig. 261.



Images
virtuelles
et droites.

Plaçons un objet AB en avant de cette lentille, menons l'axe secondaire Ao correspondant au point A , le rayon AC parallèle à l'axe et le rayon réfracté correspondant CD . Ce rayon prolongé rencontrera l'axe en un point a qui sera le foyer virtuel conjugué de A ; ab sera l'image virtuelle de AB . Cette image est toujours droite, plus rapprochée de la lentille que l'objet, et conséquemment plus petite que lui. Elle est toujours comprise entre la lentille et son foyer principal.

CHAPITRE V.

VISION.

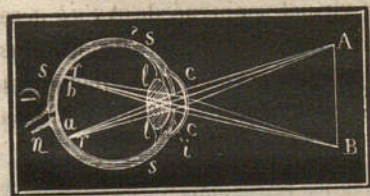
394. Les considérations qui précèdent nous fournissent une explication simple des phénomènes physiques de la vision chez l'homme dont la chambre noire peut nous donner une idée. Cet instrument a reçu des formes très-variées; la plus simple est celle des appareils photographiques. Une caisse rectangulaire en bois, noircie intérieurement et formée

Chambre noire.

de deux parties glissant l'une dans l'autre, est fermée postérieurement par une glace de verre dépoli que l'on peut remplacer à volonté par la plaque ou la feuille de papier impressionnable, et munie antérieurement d'un système de lentilles convergentes. Les rayons émanant des objets extérieurs et réfractés par ces lentilles viennent former l'image de ces corps dans l'intérieur de la chambre. En allongeant ou raccourcissant la caisse, on rencontre un point où cette image vient se peindre sur la glace de verre avec une admirable fidélité. Plus les objets sont rapprochés, plus il faut allonger la caisse pour obtenir la netteté désirée.

L'œil est composé extérieurement d'une enveloppe *ss*, opaque, résistante, de forme sphérique, appelée *sclérotique* ou *cornée opaque*, et percée antérieurement d'une large ouverture circulaire où elle est continuée par une autre

Fig. 262.



membrane *cc*, à courbure plus prononcée, et appelée *cornée transparente* ou simplement *cornée*. Cette enceinte est partagée en deux parties inégales par le *crystallin ll*, lentille bi-convexe à courbure antérieure moindre que la courbure postérieure, et par les membranes qui retiennent cet organe dans la position qu'il doit conserver. Au-devant du cristallin est tendue, au milieu de l'humeur aqueuse qui remplit les chambres antérieure et postérieure de l'œil, une membrane appelée *iris*, percée en son centre d'une ouverture circulaire, la *pupille*, dont le diamètre est variable suivant les besoins de la vision. Enfin, en arrière du cristallin, nous trouvons l'humeur vitrée qui remplit la plus grande partie de la capacité de l'œil, et,

OEil.

Sclérotique.

Cornée.

Cristallin.

Iris.

Pupille.

au fond, tendue sur la paroi interne de la sclérotique, la rétine, épanouissement du nerf optique.

395. L'œil peut donc être considéré physiquement comme une chambre noire dans laquelle les rayons provenant des objets extérieurs pénétreraient par la pupille. Dans leur trajet, ils y subissent des déviations qui, bien réglées, donnent à la vision la netteté qui la caractérise ordinairement chez l'homme.

Réfractions
opérées
dans l'œil.

L'humeur aqueuse se moulant sur la surface interne de la cornée, produit sur les rayons lumineux l'effet d'une lentille convergente; et cet effet se trouve complété par le cristallin. Cette lentille joue, en effet, dans la vision, un rôle important qui ressort de sa forme même, mais que l'on a toutefois exagéré. S'il est terminé par des surfaces à fortes courbures, il est plongé au milieu de liquides dont le pouvoir réfringent diffère trop peu du sien pour que son action n'en soit pas considérablement affaiblie. Les résultats obtenus chaque jour dans l'opération de la cataracte, qui consiste à extraire ou à abaisser le cristallin devenu opaque par lui-même ou par sa capsule, confirment cette opinion basée d'ailleurs sur des données physiques. Quoi qu'il en soit, par l'effet des réfractions qu'ils subissent dans l'œil, les rayons qui émanent des objets extérieurs viennent former derrière le cristallin une image en miniature de ces objets. Si le lieu de cette image est sur la rétine même, elle s'y peint avec une netteté remarquable : la vision est nette elle-même. Si le lieu vrai de cette image, ou le foyer conjugué des objets extérieurs, est situé en avant ou en arrière de la rétine, l'image peinte sur cette membrane, et, par suite, la vision, sont plus ou moins confuses.

396. L'image est renversée au fond de l'œil. Comment pouvons-nous voir les objets droits?

On s'est long-temps préoccupé de cette question que l'on doit s'étonner de retrouver partout où il s'agit de vision. Il semblerait que l'âme vient regarder derrière la rétine les images que celle-ci reçoit ; autant vaudrait qu'elle regardât directement dehors. L'homme n'a conscience que des modifications qui se passent en lui ; les sens n'accusent rien autre chose. Il nous faut une longue habitude pour rattacher aux objets extérieurs les impressions que nous ressentons en nous-mêmes ; mais ce travail intellectuel nous devient tellement familier, qu'il se fait à notre insu. Rendons la vue à un aveugle de naissance : un spectacle plein de magnificence se déroulera en lui-même ; il ne songera jamais à rattacher aux objets extérieurs les sensations dont il est rempli, si ses autres sens, et particulièrement celui du toucher, ne l'ont déjà mis en rapport avec eux. Semblable à la touche qui transmet la pression du doigt jusqu'à la corde sonore, chaque fibrille nerveuse transmet isolément jusqu'au cerveau l'impression du point lumineux qui s'est formé sur son extrémité épanouie dans la rétine. Les relations que nous présentent ces extrémités nerveuses sur la rétine sont-elles conservées dans le cerveau ? rien ne le prouve ; mais l'expérience nous a appris que les impressions qui nous sont transmises par deux mêmes fibrilles correspondent toujours à deux points extérieurs qui ont entre eux deux rapports déterminés. La même expérience nous a appris que lorsque deux fibrilles correspondantes dans nos deux yeux transmettent au cerveau deux impressions distinctes, nous devons les rattacher au même objet, et nous le faisons sans même en avoir conscience. Mais soulevons un de nos yeux avec les doigts, l'image de l'objet se déplacera sur la rétine de l'œil dévié ; les fibrilles nerveuses qui transmettront les impressions ne seront

plus celles qui d'ordinaire sont affectées simultanément : nous verrons double. Un homme, récemment opéré du strabisme, voit double jusqu'à ce qu'il ait refait l'éducation de ses yeux; et si on pouvait brusquement changer la distribution des fibres nerveuses dans l'œil d'un adulte, tous les rapports des objets extérieurs seraient bouleversés pour lui jusqu'à ce qu'il eût refait le travail de son enfance.

Qualités
de la vision.

397. La faculté visuelle est très-inégalement développée chez les divers animaux et même chez l'homme. Des différences que nous observons sous ce rapport, les unes sont purement physiques et dépendent des réfractions qui s'effectuent dans l'œil, les autres sont physiologiques.

Délicatesse
de la vision.

Nous rattachons les qualités de l'œil à quatre principales :
1^o *La délicatesse de la vision* dépend de l'étendue occupée sur la rétine par chaque fibrille nerveuse. Chaque fibrille transmet au cerveau la somme des impressions reçue par elle, et nous ne pouvons distinguer deux points qu'autant que leurs images tombent sur deux fibrilles distinctes; de même que nos doigts ne peuvent produire chacun un son distinct dans un piano, que s'ils tombent chacun sur une touche différente. L'étendue des papilles nerveuses de la rétine humaine varie de 0^{mm}003 à 0,004; le plus petit angle sous lequel nous puissions distinguer deux objets varie de 30 à 40 secondes, nombres qui s'accordent exactement entre eux. Nous apercevons cependant nettement les étoiles qui sous-tendent un angle visuel incomparablement plus petit; la cause en est dans la qualité suivante :

Sensibilité
de l'œil.

2^o *La sensibilité de l'œil* dépend du degré d'impressionnabilité de la rétine, qualité essentiellement variable d'un individu à un autre. Une image couvre toute l'étendue d'une papille nerveuse et a une intensité égale à 1; une autre image a une intensité égale à 1000, et ne couvre

que la millièrne partie de l'étendue d'une papille nerveuse : les deux impressions seront égales ou fort près de l'être. Un point noir est déposé sur une feuille de papier blanc ; les papilles de notre rétine seront également impressionnées à l'exception de celle sur laquelle tombera l'image du point noir. Si cette image occupe $\frac{1}{1000}$ de la papille, l'impression qu'elle transmettra au cerveau sera plus faible que les autres de $\frac{1}{1000}$ de leur valeur ; et si notre rétine est sensible à cette différence, le point noir sera visible pour nous. Déposons un second point à côté du premier, l'impression sera plus forte, mais elle restera unique tant que l'écartement des deux points ne sera pas assez grand pour que leurs deux images recouvrent deux papilles distinctes, que l'angle sous lequel on les voit ne dépassera pas 40 ou 50 secondes.

3^o *La netteté* de la vision dépend de la précision dans la forme et l'ajustement des parties réfringentes de l'œil, d'où dépend la netteté de l'image peinte à la surface de la rétine. Cette qualité est loin d'atteindre le degré de perfection qu'on se plaît à lui accorder généralement, comme on peut s'en convaincre en regardant avec un seul œil le croissant d'une nouvelle lune. Bien des personnes dont la vue semble cependant parfaite, en verront les cornes diffuses, quelquefois doubles ou triples.

Netteté
de la vision.

4^o *L'accommodement aux distances.* Chacun sait qu'il est une distance à laquelle il distingue plus nettement les objets. Cette distance n'est pas absolue : nous voyons et plus loin et plus près ; mais l'intervalle qui existe entre les distances extrêmes où les objets sont vus distinctement est très-variable chez les hommes. Chez les uns, elle est courte et bien tranchée ; chez les autres, elle est presque indéfinie. A partir de deux centimètres, je lis à peu près avec une égale facilité des caractères d'imprimerie quelle

Accommodement
aux distances.

que soit leur distance, pourvu qu'ils grandissent à mesure qu'ils s'éloignent, et que leur image occupe dans l'œil la même étendue. Beaucoup de personnes sont dans ce cas. Cependant, si nous nous rappelons la théorie des lentilles, § 392, nous voyons qu'à mesure qu'un objet se rapproche de l'œil, son image s'y forme à une distance de plus en plus grande de la cornée. Si donc l'œil conservait toujours sa forme et sa puissance de réfraction, la vision ne serait nette que dans une position déterminée de l'objet, telle que son image se formât sur la rétine même. Il faut donc que l'œil se modifie pour s'adapter aux distances. Plaçons-nous près d'une fenêtre au travers de laquelle nous puissions voir les objets extérieurs. Si nous fixons les barreaux de la fenêtre, les objets seront diffus; si nous fixons les objets, les barreaux cesseront de nous paraître nettement limités, même en nous servant d'un seul œil, et nous avons conscience du changement que nous apportons dans notre œil en passant d'un objet à l'autre. Quelle est la nature de ce changement? ce sujet a été l'objet d'un grand nombre de discussions de la part des savants, et la question est fort diversement jugée. L'opinion la plus générale et qui nous paraît la plus vraie, consiste à mettre ce changement sous la dépendance des muscles moteurs de l'œil.

Variations
dans
la distance
moyenne
de la vision.

Myopes.

Presbytes.

398. La distance moyenne de la vision distincte est également très-variable. Chez les myopes, elle est plus courte; chez les presbytes, elle est plus longue que chez la généralité des hommes. On parvient à corriger ces défauts par l'usage de verres divergents pour les myopes dont l'œil réfracte trop les rayons, et par des verres convergents pour les presbytes dont l'œil ne les réfracte pas assez. Toute la question se réduit à ceci : adapter à l'œil un verre tel que les rayons lumineux qui émanent d'un objet AB placé à la distance ordinaire de 3 à 4 décimètres, donnent, après avoir traversé

Fig. 263.

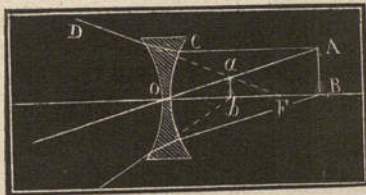
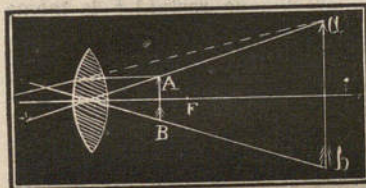


Fig. 264.



convergente, fig. 264.

ce verre, une image virtuelle ab qui soit à une distance de l'œil égale à la distance de la vision distincte pour cet œil. Les figures montrent que AB étant supposée à une distance constante de la lentille, l'image virtuelle en serait plus rapprochée si cette lentille est divergente, fig. 263, et plus éloignée si la lentille est

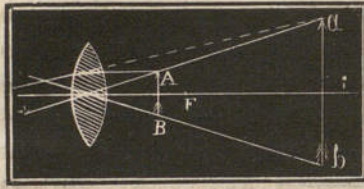
CHAPITRE VI.

INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

399. Le plus simple des instruments d'optique est la loupe ou microscope simple. Il nous suffira de rappeler ce que nous avons dit § 392. Quand un objet est placé entre une lentille convergente et son foyer principal, les rayons qui en émanent après avoir traversé la lentille donnent une image virtuelle droite et agrandie de l'objet. Plus celui-ci est près du foyer principal et éloigné de la lentille, plus son image virtuelle est éloignée elle-même et agrandie ; mais, dans les usages ordinaires de la loupe, il faut toujours régler la position de l'objet, de manière que l'image virtuelle ab soit à la distance de la vue distincte. Pour obtenir ce résultat, il faut que l'objet soit d'autant plus rapproché

Loupe.

Fig. 265.



Microscope
simple.

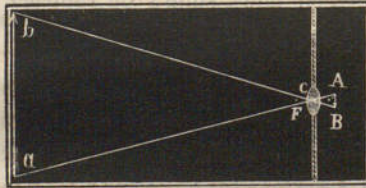
même que le rapport de leurs distances à la lentille, plus l'objet en sera rapproché, son image restant à la même distance, plus cette image sera agrandie. Dans le microscope simple ou de Raspail, la loupe est fixée sur un pied, et l'objet repose sur un support que l'on peut élever ou abaisser à volonté de manière à placer l'objet dans la position convenable. Ce microscope peut grossir jusqu'à 200 fois les objets, mais il fatigue alors la vue. Un miroir placé au-dessous sert à réfléchir la lumière du ciel sur l'objet, afin de l'éclairer convenablement.

Microscope
solaire.

Lanterne
magique.

400. Le microscope solaire et la lanterne magique sont fondés essentiellement, comme le microscope simple, sur l'emploi d'une lentille convergente. Mais ici les images devant être réelles et considérablement agrandies, l'objet

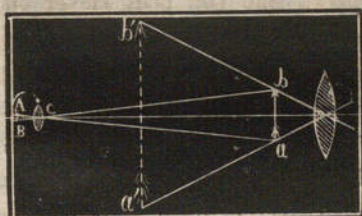
Fig. 266.



est situé en dehors du foyer principal de la lentille, et très-près de ce foyer. Dans ce cas encore, que nous avons représenté, *fig. 266*, le rapport de l'image à l'objet est le même que le rapport de leurs distances à la lentille, car les deux triangles ABC et abc étant semblables, donnent $ab : AB :: ac : AC$. A mesure que l'objet se rapproche du foyer F, et par conséquent de la lentille, l'image s'en éloigne et grandit. La lumière qui émane de

l'objet AB étant répartie sur une surface ab beaucoup plus grande, se trouve considérablement affaiblie; on est donc obligé d'éclairer artificiellement cet objet, comme dans le microscope simple. On le fait avec la lumière d'une lampe dans la lanterne magique, et avec les rayons solaires dans le microscope solaire. Dans les deux cas, pour que l'éclairage soit encore plus puissant, les rayons lumineux sont concentrés sur l'objet à l'aide de lentilles convergentes ou de miroirs concaves. Les images sont toujours renversées.

Fig. 267.



401. La réunion des deux appareils précédents constitue le microscope composé, ou simplement microscope. A l'extrémité inférieure d'un tube de cuivre est placée la lentille c , fig. 267, appelée ici *objectif*; à l'extrémité supérieure du même tube est la loupe appelée *oculaire*. L'objectif donne une image ab agrandie et renversée de l'objet AB ; cette image est ensuite vue comme un objet au travers de la loupe qui en donne une seconde image agrandie encore, droite par rapport à la première, et par conséquent renversée par rapport à l'objet. Pour accroître la puissance et la netteté du microscope, on double ou triple l'objectif de manière à en augmenter la convergence et à dilater par là la première image $a b$. La loupe est également formée de deux lentilles entre lesquelles vient se former l'image $a b$. La lentille supérieure seule fait office de loupe. Un bon microscope peut grossir de 12 à 1500 fois les objets en diamètre. Un miroir et un porte-objet mobiles à l'aide de

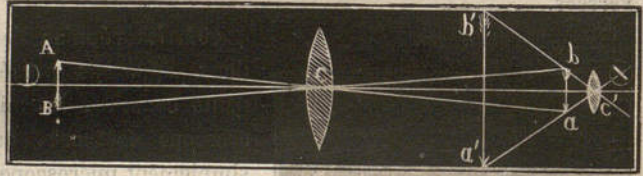
Microscope composé.

vis ou de roues dentées, servent à éclairer fortement l'objet et à faciliter la mise au point.

Lunette
astronomique.

402. Les lunettes astronomiques se composent, comme le microscope, d'un objectif et d'un oculaire. Ici, toutefois, les objets que l'on veut regarder étant en général situés à une grande distance, l'objectif doit être large pour recevoir le plus de lumière possible, et doit avoir un faible pouvoir convergent. Car, contrairement à ce qui se passe dans

Fig. 268.



le microscope, l'image réelle des objets est d'autant plus petite que la lentille est plus forte, qu'elle a une distance focale plus courte. L'oculaire est le même que dans le microscope. L'objectif C fournit une première image renversée en ba' ; cette image, vue au travers de la loupe C' , donne l'image virtuelle $b'a'$, qui reste renversée par rapport à AB . L'angle visuel de BA est ACB ou bCa ; l'angle visuel de son image est $b'C'a$; on voit donc que plus la distance Cb sera grande et la distance bC' petite, plus le grossissement sera considérable.

Lunette
terrestre.

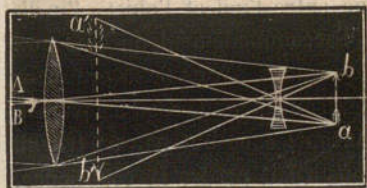
Le renversement des objets par les lunettes astronomiques est de peu d'importance; il n'en est plus ainsi pour les lunettes terrestres; aussi, dans ces dernières, a-t-on ajouté à la loupe un système de deux lentilles destinées à redresser l'image réelle en en fournissant une seconde également réelle mais renversée. Les lunettes terrestres n'ont jamais un bien fort grossissement, l'introduction de ces deux verres est donc sans inconvénients. Les lunettes astronomiques, au contraire,

devant grossir fortement des objets souvent peu lumineux, on doit éviter toute cause de déperdition de lumière; et comme au passage de chaque lentille il s'opère sur les deux faces une double réflexion qui diminue dans une assez forte proportion la lumière transmise, on en restreint le nombre autant que possible.

La lunette de Galilée, ou lunette des spectacles, est la plus ancienne des lunettes, celle qui la première a servi aux observations astronomiques; elle présente l'avantage de faire voir les objets droits avec deux verres seulement, et d'être beaucoup

Lunette
de Galilée.

Fig. 269.



plus courte que les lunettes ordinaires. L'objectif est semblable à celui des lunettes terrestres ou astronomiques, mais à court foyer.

L'oculaire est divergent et placé entre l'image réelle qui sans lui serait formée par l'objectif et l'objectif lui-même, ce qui contribue encore à diminuer l'étendue de l'instrument. L'oculaire divergent transforme avant sa formation l'image réelle et renversée ab en une image virtuelle et redressée $b'a'$. La lunette de Galilée grossit peu les objets, et, comme toutes les lunettes, elle les grossit inégalement selon les vues, parce que, pour chaque œil, elle doit être réglée de telle manière que l'image virtuelle que lui fournit l'oculaire se trouve à la distance de sa vue distincte, laquelle est variable, comme nous l'avons vu.

Dans les télescopes, la première image était formée par un ou deux miroirs concaves à très-long foyer, et cette image était regardée au travers d'une loupe, comme dans les lunettes astronomiques ordinaires. Ces instruments sont à peu près complètement abandonnés aujourd'hui, à cause des diffi-

Télescopes.

cultés que l'on rencontre dans leur construction, des soins minutieux qu'il faut apporter à leur conservation, et des dimensions considérables qu'il faut leur donner pour compenser l'affaiblissement que la lumière éprouve dans la réflexion à la surface des miroirs les mieux polis.

Estimation
des grandeurs
et des
distances.

403. On dit ordinairement que les lunettes rapprochent plus ou moins les objets. Toutes mettent les images de ces objets à la même distance, celle de la vision distincte; mais l'estimation des distances par l'œil est une opération très-complexe dans laquelle entrent plusieurs éléments. La dégradation des teintes due à une superposition croissante de la couche atmosphérique entre l'œil et l'objet, l'inclinaison des axes des yeux, l'accommodement de l'œil aux distances, la connaissance que nous avons de la grandeur de l'objet, l'angle qu'il sous-tend ou l'étendue occupée par son image sur la rétine, tout concourt à ce but par un travail intellectuel dont l'usage nous a fait perdre la conscience. Mais qu'une erreur quelconque ait lieu dans l'appréciation de l'une de ces données, et cette erreur se reproduira dans le résultat final. Aux diverses heures du jour, la lune et le soleil ont rigoureusement le même volume, sous-tendent le même angle dans notre œil, leur image occupe le même volume sur notre rétine; mais le ciel nous apparaît comme une voûte surbaissée, plus éloignée de nous vers sa base que vers son sommet; et comme nous rapportons la lune ou le soleil à cette voûte, nous les voyons, malgré nous, beaucoup plus grands à l'horizon qu'au zénith. Pour que deux objets inégalement éloignés sous-tendent dans notre œil le même angle, il faut, en effet, qu'ils aient des grandeurs inégales: une erreur dans l'appréciation des distances en amène une autre dans l'estimation des grandeurs. Quand nous regardons un homme au travers de la lunette, si son image a la grandeur ordinaire à notre

Erreurs
dans la vision.

espèce, nous le croyons sans difficulté à la portée de notre main ; mais si cette image est plus petite, deux effets viennent se combattre : la précision des détails qui tend à la rapprocher de nous, l'angle visuel sous lequel elle nous apparaît et qui tend à nous la faire rejeter à une distance telle qu'un homme y soit vu sous un angle pareil. L'image est à quelques décimètres de nous, et nous la rejetons souvent très-loin : ici c'est l'intervention des grandeurs qui nous trompe sur l'évaluation des distances. La nuit, nous jugeons mal des distances ; souvent aussi nous commettons les erreurs les plus bizarres sur les dimensions des objets : le moindre buisson peut nous sembler un arbre. Un temps brumeux peut produire un effet semblable par une exagération dans la dégradation des teintes. Si un homme ignorant des lois de la perspective a tant de peine à s'y soumettre, c'est que son jugement intervient pour égarer sa main : au lieu de représenter fidèlement le tableau peint au fond de son œil, il interprète ses impressions. Les sens nous trompent donc ? Les sens qui nous mettent en relation avec le monde extérieur ne nous transmettent rien autre chose que des impressions : ce sont ces modifications internes seules dont nous avons conscience. L'usage, l'éducation, le raisonnement, nous montrent ensuite les rapports qui existent entre elles et les corps qui leur ont donné naissance ; mais cette induction repose sur des éléments divers qui souvent sont en désaccord. L'impression est ce qu'elle doit être d'après le corps modificateur et l'état de l'appareil organique modifié. L'interprétation du sens et de la valeur de la modification est trop souvent fautive.

LIVRE HUITIÈME.

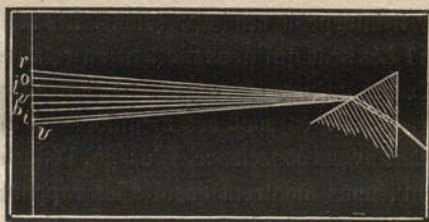
DES RAYONNEMENTS COLORIFIQUES, CHIMIQUES,
PHOSPHORESCENTS, CALORIFIQUES.CHAPITRE I^{er}.

RAYONNEMENTS COLORIFIQUES.

Décomposition
de la lumière
par le prisme.

404. La lumière solaire est-elle homogène? Ces brillantes couleurs dont la nature est si richement parée sont-elles contenues en elle, ou résultent-elles d'une modification profonde apportée dans sa nature par les corps? Le prisme

Fig. 270.

Spectre
lumineux.

nous fournit une réponse nette à cette question. Reprenons l'expérience, § 386. Un faisceau mince de rayons parallèles tombe sur un prisme; en le traversant, il est dévié de sa direction primitive; mais en même temps il est modifié dans sa nature. Les éléments hétérogènes qui le composent sont inégalement réfractés par le prisme, et, de parallèles qu'ils étaient, ils deviennent divergents et se séparent de plus en plus à mesure qu'ils s'éloignent du prisme. Recevons le faisceau ainsi modifié sur un écran; sa trace lumineuse allongée sera peinte des plus éclatantes couleurs. Entre aucune d'elles il n'est possible de trouver une limite nettement

tranchée; nous voyons autant de couleurs qu'il y a de points éclairés sur l'axe du *spectre* lumineux; on peut cependant les ranger en sept groupes principaux ainsi répartis dans l'ordre de leur déviation décroissante :

Violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

Le phénomène devient surtout remarquable lorsque le faisceau de lumière dispersé pénètre dans la chambre noire par une fente étroite verticale, qu'il est reçu sur un prisme bien pur également vertical, que derrière ce prisme est disposée une lentille à très-long foyer, et que l'écran sur lequel on reçoit le spectre est situé au foyer conjugué de la lentille. Les rayons colorés sont alors séparés autant que possible; le spectre est d'une grande beauté. On voit en même temps qu'il est sillonné d'une multitude de raies noires disséminées dans toute son étendue, ce qui montre qu'un grand nombre de rayons colorés manquent dans l'échelle chromatique du soleil. Ces raies noires ne reparaissent plus dans les spectres formés avec la lumière des étoiles, la lumière électrique, ou les lumières artificielles.

Chaque couleur du spectre est parfaitement homogène pour le prisme, de quelque substance qu'il soit formé. Si on l'isole et qu'on la reçoive sur un nouveau prisme, elle ne subit plus de décomposition. On peut toutefois la reproduire avec une grande fidélité par le mélange, en proportions convenables, des autres couleurs différentes et séparables ultérieurement par le prisme.

405. Reprenons les couleurs du spectre; réunissons-les par le moyen de prismes, de miroirs ou de lentilles, et nous régèrerons la lumière blanche que nous pourrions décomposer de nouveau. Mais si nous ne prenions pas toutes les couleurs du spectre, ou si nous les prenions dans des proportions autres que celles dans lesquelles elles se trouvent distribuées sur le spectre, au lieu de lumière blanche, nous

Raies
du spectre.

Homogénéité
des couleurs
du spectre.

Couleurs
composées.

Reconstitution
de la lumière
blanche.

aurions une lumière colorée. Nous pouvons reconstituer d'une autre manière la lumière blanche. Peignons les secteurs d'un disque blanc des diverses couleurs du prisme, et faisons tourner ce disque d'un mouvement rapide autour de son centre. Chaque point impressionné de la rétine le sera successivement par les sept couleurs; et comme l'impression persiste pendant un dixième de seconde environ, la sensation sera la même sensiblement que si toutes les impressions étaient simultanées. Le disque nous paraîtra d'un blanc sale ou terne, parce que, chaque secteur éteignant une grande partie de la lumière qu'il reçoit, l'éclairement sera considérablement affaibli. Cette recombinaison mécanique des couleurs nous montre combien il nous est difficile de faire l'analyse complète de nos sensations. L'œil semble même inférieur, sous ce rapport, à l'oreille qui nous permet de distinguer nettement les divers sons d'un orchestre. Cette différence tient probablement à une disposition particulière de l'oreille et du nerf acoustique dont chaque fibrille pourrait bien être spécialement affectée à la transmission d'un son particulier. On comprend, d'après ce qui précède, les apparences que présentent les corps lorsqu'on les regarde au travers du prisme: ils sont déviés, mais en même temps ils sont colorés. C'est que les objets nous envoient de la lumière toujours plus ou moins composée; chaque espèce de rayons, réfractée d'un angle variable avec sa nature, nous donne du corps une image colorée et inégalement déviée. Ces images se superposent incomplètement sur la rétine, et, tandis que la portion de l'image complexe, où toutes les images élémentaires sont réunies, conserve sa teinte naturelle, les autres points sont plus ou moins colorés, en bleu dans le sens de la déviation, en rouge dans le sens opposé.

Coloration
des corps
vus à travers
le prisme.

406. Les corps de la nature opèrent eux aussi la dé-

composition de la lumière, et doivent à cette propriété leurs couleurs variées et brillantes. Le cuivre, par exemple, réfléchit facilement les rayons rouges, et retient ou éteint la plupart des autres. Il en est ainsi des rayons jaunes pour l'or et le laiton, des rayons bleus pour l'indigo, des rayons verts pour les feuilles des plantes, etc.

Décomposition
de la lumière
par les corps
colorés.

De même, les milieux transparents ne se laissent pas traverser avec une égale facilité par tous les rayons colorés. Ils sont plus transparents pour les rayons de la couleur dont ils sont teints que pour toute autre.

Ce n'est pas que les corps colorés réfléchissent ou transmettent de la lumière simple : ce cas est extrêmement rare. Nous avons vu que le mélange de plusieurs couleurs en proportion définie constitue toujours une couleur déterminée. La nature de ces mélanges peut être étudiée par le prisme.

407. L'hétérogénéité de la lumière et sa décomposition par les substances réfringentes ont été pendant long-temps un grand obstacle au perfectionnement des divers instruments d'optique, et la difficulté est loin d'être résolue d'une manière complète encore aujourd'hui. Une lentille convergente simple donne autant d'images d'un objet extérieur, que cet objet lui envoie de rayons de couleurs différentes. L'inégale réfrangibilité de ces rayons fait que ces images se produisent à des distances inégales de la lentille, et ont, par suite, des grandeurs pareillement inégales. Les violettes sont les plus rapprochées et les plus petites, les rouges les plus éloignées et les plus grandes. Toutes ces images ne se superposent donc pas rigoureusement ; les rouges débordent les autres, et ce phénomène, quelque peu marqué qu'il soit, se trouvant amplifié par les loupes, les images des corps vus au travers des lunettes à verres simples, doivent être colorées, bordées de franges

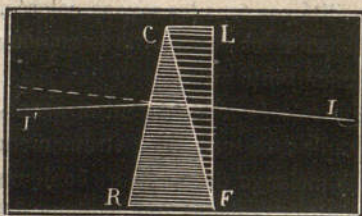
Coloration
des images
fournies
par les lentilles
convergentes.

Achromatisme.

rouges. On obvie généralement à cet inconvénient en *achromatisant* les lentilles.

Le pouvoir dispersif des corps ne varie pas dans le même rapport que leur pouvoir réfringent. De deux prismes, l'un de Flint, l'autre de Crown, qui dévient également la lumière, le premier dispersera plus les rayons

Fig. 271.

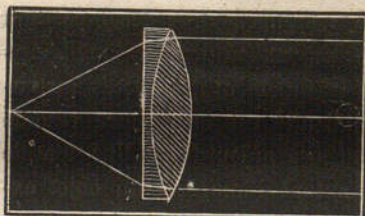


Des prismes.

lorés que le second. On peut donc tailler dans ces

substances deux prismes qui dispersent également sans que leur pouvoir réfringent soit le même; et si on accole ces deux prismes en

Fig. 272.



Des lentilles.

sens inverse, leur ensemble dévierait la lumière sans la colorer. On peut de la même manière tailler deux lentilles, l'une convergente en Crown, l'autre divergente en Flint, dans des proportions telles que, réunies ensemble, elles forment

un système convergent sans pouvoir dispersif. Ces lentilles, qui réunissent sensiblement toutes les couleurs au même point, sont dites *achromatiques*: on les emploie actuellement comme objectifs dans toutes les lunettes ou microscopes même les plus médiocres.

Chromasie de l'œil.

408. L'œil est-il achromatique? La pensée préconçue que l'œil *doit* être un instrument d'une perfection que nous ne saurions atteindre, a fait admettre *à priori* cette opinion. Les faits l'ont bientôt démentie dès qu'on a voulu consulter l'expérience. L'œil n'est point achromatique, et il présente

des imperfections beaucoup plus graves, car son peu d'étendue rend cette qualité insignifiante. La nature est admirable dans ses œuvres; moins que tout autre, nous ne voudrions le nier; mais c'est dans l'ensemble des moyens qu'elle emploie pour arriver à son but qu'il faut en chercher des preuves. Si la fonction d'un organe était subordonnée à la précision mathématique des parties qui composent cet organe, la fonction serait à tout instant compromise. Cette précision ne se rencontre nulle part dans la nature: elle est partout l'ouvrage des hommes; mais ce qui creuse un abîme infranchissable entre les œuvres de l'homme et celles de la nature, c'est la vie dont nous admirons partout les merveilles, sans qu'il nous soit jamais donné de les imiter.

409. Chaque rayon coloré imprime à la rétine une modification spéciale qui nous permet de le reconnaître et de lui donner un nom. Mais rien ne nous autorise à supposer que le rouge, par exemple, impressionnera deux hommes de la même manière. Tous lui donneront le même nom, car les mots sont conventionnels; mais si les impressions sont soumises à des lois générales, elles ont toujours quelque chose d'individuel. Aussi rencontre-t-on souvent des personnes qui ne sont sensibles qu'à deux ou trois couleurs, qui voient tout bleu ou rouge, par exemple; d'autres même pour lesquelles la notion des couleurs n'existe pas: elles voient tout d'un blanc plus ou moins gris.

410. La coloration des rayons lumineux paraît se rattacher intimement à la rapidité de la vibration lumineuse, comme la hauteur des sons dépend de la rapidité du mouvement sonore. Bien que cette opinion ait été contestée, dans l'état actuel de la science elle paraît encore la plus probable. Des faits qu'il nous est impossible d'analyser ici ont même permis de mesurer les longueurs d'ondes

Sensibilité
de l'œil
aux couleurs.

Cause
de la coloration
des rayons.

lumineuses. Les résultats obtenus et que nous transcrivons ici, comparés à la grande vitesse de la lumière, pourront nous donner une idée de la prodigieuse rapidité des vibrations lumineuses. Ils nous montreront en même temps que l'intervalle des rayons extrêmes ne comprend guère qu'une quinte.

Noms des couleurs.	Longueurs d'ondes en millimètres.
Violet.....	^{mm} 0,000423
Indigo.....	0,000449
Bleu.....	0,000475
Vert.....	0,000521
Jaune.....	0,000551
Orangé.....	0,000583
Rouge.....	0,000620.

CHAPITRE II.

DES RAYONNEMENTS CHIMIQUES ET PHOSPHORESCENTS.

Propriétés
chimiques
du rayonnement
solaire.

411. La lumière agissant sur la rétine produit en nous des impressions lumineuses. Quand elle agit sur les corps organisés ou non, elle donne naissance à des phénomènes chimiques variés et remarquables à beaucoup d'égards. Nous savons, en effet, qu'un mélange d'hydrogène et de chlore détonne dès qu'il est frappé par les rayons solaires; que la lumière du jour noircit le chlorure d'argent, altère ou décompose les minces pellicules d'iodure et bromure d'argent qui recouvrent les plaques daguerriennes; que les forces vitales sont impuissantes à produire un grand nombre de leurs phénomènes accoutumés sans l'intervention de la lumière.

Cette propriété chimique de la lumière ne réside pas au même degré dans toutes les parties d'un faisceau de rayons solaires dispersé par le prisme; et les diverses substances

impressionnables ne sont pas également sensibles aux mêmes rayons solaires. D'une manière générale cependant, et sauf quelques exceptions assez rares, l'activité des rayons solaires est d'autant plus grande qu'ils sont plus réfrangibles. Dans le spectre solaire, l'action débute au rouge, quelquefois au jaune, et va en augmentant d'intensité jusqu'au violet et même au-delà. La partie lumineuse du spectre ne jouit pas seule, en effet, de la propriété chimique : cette propriété s'étend beaucoup plus loin que la limite extrême des rayons violets, et sur une longueur souvent au moins aussi grande que l'étendue de la partie lumineuse active.

Doit-on admettre une identité entre les rayons chimiques et les rayons colorifiques de la lumière? L'expérience démontre que les rayons chimiques subissent toutes les modifications que nous cherchons à imprimer à la lumière : ils se réfléchissent, se réfractent, se dispersent comme celle-ci, et cette analogie se poursuit beaucoup plus loin qu'il ne nous est possible de la suivre. Ces faits toutefois ne suffisent pas encore pour nous autoriser à admettre l'unité, l'identité de l'agent qui donne lieu à ces deux ordres de phénomènes.

412. On a utilisé, dans les arts, les propriétés chimiques de la lumière qui, dans d'autres conditions, sont si funestes à la conservation de leurs produits. Chacun connaît aujourd'hui les résultats obtenus avec le daguerréotype : nous allons passer rapidement en revue les diverses préparations qui servent à les produire. Les rayons lumineux viennent peindre au fond de la chambre noire, § 394, une image fidèle des objets extérieurs. Les rayons chimiques, obéissant aux mêmes lois, viennent aussi figurer aux mêmes points leur image directement invisible à notre œil, mais sensible à d'autres agents. Dans le procédé de M. Daguerre, plus ou moins modifié par l'usage, le tableau impressionnable est

Rayons
chimiques.

Photographie.

une lame de cuivre plaquée d'argent auquel on a fait subir plusieurs séries d'opérations.

La lame d'argent est d'abord polie avec soin à l'aide d'un tampon de coton cardé et d'une pincée de tripoli très-fin imbibé d'une goutte d'eau acidulée avec un quinzième de son poids d'acide nitrique. Quand elle est sèche et brillante, on l'expose à la vapeur d'iode dans une boîte en bois spécialement destinée à cet usage. L'argent se colore, et une minute environ suffit pour lui faire prendre une teinte jaune d'or bien uniforme qu'il importe de ne pas lui laisser dépasser.

Cette préparation est suffisante dans beaucoup de cas ; cependant, lorsque l'on veut faire un portrait, et qu'il importe d'opérer très-rapidement, soit pour ne pas fatiguer le modèle, soit pour bien saisir la physionomie si variable de la figure humaine, on expose la plaque aux émanations de liqueurs presque aussi variées que le nombre des opérateurs, et dans lesquelles entrent essentiellement l'iode, le brome, le chlore.

La plaque ainsi préparée est transportée soigneusement à l'abri du contact de la lumière, dans la chambre noire où elle doit recevoir l'impression de l'image que l'on désire fixer. La durée de l'exposition varie depuis quelques secondes jusqu'à plusieurs minutes, suivant l'intensité de la lumière reçue et la nature des modifications préparatoires imprimées à la plaque.

La plaque retirée de la chambre obscure ne paraît avoir subi aucune altération ; mais si on l'expose sous un angle de 45° , dans une boîte, aux vapeurs du mercure chauffé à 60° , on voit le dessin se manifester successivement comme s'il était recouvert d'un brouillard opaque qui se dissiperait peu à peu. Le mercure s'est précipité en gouttelettes microscopiques sur toutes les parties de la plaque

où l'iodure a été altéré par la lumière. La forme de ces globules leur donne le pouvoir de réfléchir la lumière dans toutes les directions, tandis que la partie qui est restée polie la réfléchit dans un sens unique, déterminé par les lois de Gay-Lussac. Il y aura donc des positions de la plaque où ces parties, ne nous envoyant que peu ou point de lumière, nous paraîtront noires, tandis que les autres nous paraîtront éclairées et brillantes.

Les parties de la plaque qui sont restées intactes conservent leur couleur jaunâtre ou violacée qu'il importe de faire disparaître, soit pour éviter des altérations ultérieures, soit pour donner au dessin toute sa vigueur. On y parvient en le lavant avec une dissolution étendue d'hyposulfite de soude. La couleur des objets a une grande influence sur la perfection des images obtenues. Tous les expérimentateurs ont remarqué, par exemple, que le feuillage des arbres est ordinairement confus, bien plus à cause de sa couleur particulière qu'à cause de son agitation presque perpétuelle. Il semble que toutes les forces chimiques de la lumière ont été absorbées par le végétal, et employées par lui à l'exercice de ses fonctions.

413. Depuis la découverte de M. Daguerre, on a fait de nombreuses tentatives pour fixer les images des objets sur des papiers rendus sensibles par divers procédés. Les résultats obtenus jusqu'à ce jour permettent d'espérer que cette nouvelle application des propriétés chimiques de la lumière acquerra un jour une grande importance.

La photographie présentera cependant toujours un grand inconvénient pour les paysages. Plusieurs circonstances concourent à nous faire apprécier les distances, § 403. Un seul moyen, la dégradation des teintes, étant à la disposition du peintre ou du dessinateur, il en exagère l'importance et l'étendue pour suppléer aux autres. Cette ressource

Production
des images
photographiques
sur papier.

même n'est pas accordée au photographe, et c'est là une des principales causes de la sécheresse et du peu d'effet que présentent les paysages daguerriens, malgré l'admirable précision de leurs détails.

Les propriétés chimiques ne sont pas spéciales à la lumière solaire; les lumières artificielles en sont également douées. Mais leur couleur où prédomine le rouge montre qu'elles abondent surtout en rayons les moins réfrangibles; et comme les rayons chimiques accompagnent, au contraire, les rayons les plus réfrangibles, ces lumières sont en général très-peu actives.

Propriétés
phosphogéniques
de la lumière.

414. Outre les propriétés colorifiques et chimiques, la lumière en présente une autre dont nous dirons seulement quelques mots. Prenons trois parties coquilles d'huîtres en poudre fine, une partie de soufre, comprimons le mélange dans un creuset que nous exposerons pendant une heure à la chaleur rouge; la matière que nous obtiendrons, et que l'on appelle phosphore de Canton, acquerra, après son exposition à la lumière solaire, la propriété de rester lumineuse dans l'obscurité. Comme les actions chimiques, la production de la phosphorescence n'est pas une propriété également dévolue à tous les rayons lumineux; elle suit assez exactement la précédente dans sa répartition dans le spectre solaire; il existe même à cet égard un fait très-remarquable. Lorsque, sous l'influence des rayons les plus réfrangibles, certaines substances sont devenues phosphorescentes, si nous promenons à leur surface un faisceau de rayons rouges concentrés par une lentille, partout où a passé la lumière rouge, la phosphorescence est immédiatement éteinte. Tous les phénomènes de phosphorescence nous induisent à en rattacher la cause aux propriétés chimiques de la lumière ou à ses propriétés thermiques. La cristallisation, le frottement, la trituration, le choc, l'électricité, la chaleur, les altérations

spontanées des matières organiques, peuvent, en effet, produire la phosphorescence.

CHAPITRE III.

DES RAYONNEMENTS CALORIFIQUES.

415. Chacun sait enfin que les rayons solaires sont accompagnés de rayons de chaleur qui se propagent dans le vide et dans divers milieux pondérables avec une vitesse comparable à celle de la lumière. Ces rayons obéissent dans leur marche exactement aux mêmes lois que les rayons chimiques, phosphorescents et lumineux; ils se réfléchissent, se réfractent, se dispersent comme eux. Concentrons un faisceau de rayons solaires, au moyen d'une lentille ou d'un miroir; au foyer des rayons lumineux, nous aurons également un foyer très-ardent de chaleur. Une loupe de grandeur ordinaire suffit pour allumer de l'amadou, carboniser du drap, du papier, noircir du bois. Avec des lentilles plus fortes, on peut fondre du platine. Buffon est parvenu même à reproduire les phénomènes de combustion attribués à Archimède pendant le siège de Syracuse par les Romains; à l'aide de miroirs convergents, il a mis le feu à des planches de sapin situées à plusieurs dizaines de mètres de distance.

Le spectre calorifique, ainsi que le spectre chimique, est beaucoup plus étendu que le spectre lumineux; mais, au lieu d'être rejeté au-delà du violet, il part de cette extrémité, et s'étend notablement au-delà du rouge. Ses dimensions toutefois dépendent beaucoup de la nature du prisme qui le produit. Le maximum de chaleur mesurée par le thermomètre ordinaire ou par le thermomètre thermo-

Chaleur
solaire.

Spectre
calorifique.

électrique de M. Melloni, est, en effet, sur le jaune avec un prisme d'eau; il passe sur l'orangé avec l'acide sulfurique, sur le rouge avec le crown-glass, dans l'espace obscur un peu au-delà du rouge avec le flint-glass; enfin, avec un prisme de sel gemme, la ligne de plus grande chaleur a reculé encore dans l'espace obscur à une distance de la dernière bande rouge égale à la distance de celle-ci à la bande vert bleuâtre. Ces divers changements observés dans le spectre calorifique, ne sont pas dus à une concentration moindre ou à une dispersion plus grande des rayons de chaleur, mais à la coloration, pour la chaleur, des prismes employés; à leur *thermochroïsme*. On peut, en effet, s'en assurer directement en opérant toujours avec le même prisme, celui de sel gemme qui est le plus transmissible à la chaleur, et en interposant sur le passage du faisceau de lumière avant sa dispersion, des lames à faces planes et parallèles des diverses substances indiquées plus haut. Le même effet se reproduit. Ces substances *diathermanes* ou transmissibles à la chaleur rayonnante jouissent donc de la propriété de retenir, d'absorber ou d'éteindre une quantité variable de rayons de chaleur, en commençant par les moins réfringibles. Il en est cependant une qui présente à cette loi une exception remarquable. Le sel gemme, recouvert d'une couche de noir de fumée, livre presque exclusivement passage aux rayons de chaleur obscure.

Thermochroïsme.

Diathermanéité.

Chaleur
rayonnante
terrestre.

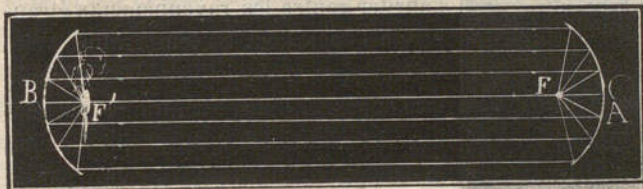
416. La chaleur qui rayonne dans tous les sens des corps chauds lumineux ou obscurs se comporte comme la chaleur solaire dont elle ne diffère que par la proportion dans laquelle s'y trouvent réunis les divers rayons calorifiques.

La faculté qu'ont les corps de rayonner de la chaleur dans toutes les directions est un fait incontestable et depuis long-temps admis; les lois suivant lesquelles se réfléchissent

leurs rayons calorifiques étaient également connues. Prenons deux miroirs sphériques A, B; disposons-les à une dizaine

Réflexion
des rayons
calorifiques.

Fig. 273.

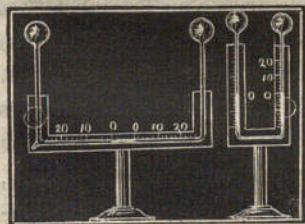


de mètres en regard l'un de l'autre, et de manière que leurs axes principaux coïncident; puis plaçons au foyer principal F de l'un d'eux A un corps chaud, un boulet porté au rouge, par exemple. Les rayons calorifiques qui émaneront du point F et qui tomberont sur le miroir A seront réfléchis par ce miroir dans une direction parallèle à l'axe FF'; arrivés sur le miroir B, ils y subiront une nouvelle réflexion, et viendront converger sensiblement au foyer principal F'. La concentration de la chaleur en ce point pourra ainsi devenir assez grande pour enflammer de la poudre et de l'amadou. C'est sur cette propriété que

Expériences
de Leslie.

Fig. 274.

275.

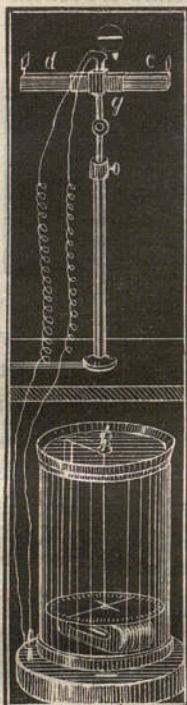


qui peut être employé au même usage, § 150.

417. La sensibilité exquise du thermo-multiplicateur de M. Melloni a permis à cet habile physicien de pousser beaucoup plus loin l'analyse des propriétés du rayonnement calorifique.

Expériences
de M. Melloni.

Fig. 276.



Lois
de la
transmission
de la chaleur
rayonnante.

Dans ses expériences, l'une des faces de la pile recevait les rayons calorifiques au travers du tube métallique destiné à l'abriter contre les rayonnements étrangers à l'opération. Sa température s'élevait au-dessus de la température de la face opposée, d'une quantité proportionnelle à l'intensité des rayons qui venaient la frapper ; un courant accusé par la déviation de l'aiguille du galvanomètre était produit, proportionnel à cette différence de température, et pouvait conséquemment lui servir de mesure, ainsi qu'à l'intensité des rayons qui lui donnaient naissance.

En opérant ainsi, M. Melloni a pu vérifier que les rayons de chaleur, de quelque source qu'ils émanent, sont soumis aux mêmes lois de réflexion et de réfraction que la lumière, et qu'ils sont composés d'un grand nombre de rayons hétérogènes séparables par le prisme ou les substances diathermanes. En plaçant à des distances variables de sa pile une source de chaleur constante, une lampe Locatelli, une spire de platine maintenue incandescente par des vapeurs d'alcool, une plaque de cuivre noircie au noir de fumée et chauffée à 400° par une lampe à alcool, un cube rempli d'eau bouillante, il s'est assuré que l'intensité de la chaleur rayonnante varie en raison inverse du carré de la distance qu'elle a parcouru. Il en est ainsi pour la lumière. Une même source de chaleur étant disposée à une distance constante de la pile, et des lames à faces parallèles planes et polies étant interposées sur le

trajet des rayons calorifiques, il a constaté que, pour une même substance, la quantité de chaleur transmise est d'autant plus grande que le poli des surfaces est plus grand et que l'épaisseur de la lame est moindre, le sel gemme faisant seule exception à cette dernière loi; que la diathermanéité ou transparence des corps pour la chaleur est très-variable d'un corps à un autre; que les corps les plus diaphanes sont loin d'être les corps les plus diathermanes, et réciproquement; enfin, que la nature de la source des rayons de chaleur, ainsi que la nature des substances qu'ils ont antérieurement traversées, influent considérablement sur la diathermanéité des corps pour ces rayons.

418. Ces résultats, analysés avec soin et rapprochés de ceux que nous avons énoncés, § 415, conduisent aux conclusions suivantes. Le sel gemme est jusqu'à présent le seul corps qui ne soit pas coloré pour la chaleur. Les rayons calorifiques sont en général d'autant plus transmissibles au travers des corps qu'ils sont plus réfrangibles, que, dans le spectre solaire, ils sont plus rapprochés du violet. Les rayonnements qui émanent des corps chauds sont d'autant plus riches en rayons peu réfrangibles et peu transmissibles, que la température de ces corps est moins élevée; ils sont d'autant plus riches en rayons plus réfrangibles et plus transmissibles, que cette température est plus élevée. La chaleur solaire est celle qui traverse le plus facilement les corps diathermanes. La chaleur obscure émanant d'un corps à 100° ou au-dessous est, au contraire, celle qui les traverse le plus difficilement: ce fait donne lieu à d'importants résultats.

419. Prenons une caisse en bois ou en liège noircie intérieurement, fermons-la par une ou deux glaces disposées parallèlement à une petite distance l'une de l'autre; puis exposons cette caisse aux rayons solaires. La chaleur

Propriétés
des rayons
calorifiques.

Influence
de l'atmosphère
sur la
température
du sol.

solaire traversant aisément le verre, pénétrera dans l'intérieur de la caisse, sera absorbée par ses parois noircies. Celles-ci s'échaufferont, rayonneront à leur tour ; mais la chaleur qui en émane étant arrêtée, au contraire, par le verre, la température pourra s'y élever jusqu'à 60 ou 80 degrés. Même effet est produit à la surface de la terre. La chaleur solaire traverse facilement l'atmosphère ; elle échauffe le sol qui la transforme en chaleur obscure. Celle-ci ne pénétrant plus au travers de l'air avec la même facilité, s'accumule sur la surface du globe. Sans l'atmosphère, la température du globe serait peut-être de 70 à 80° au-dessous de zéro.

CHAPITRE IV.

RAYONNEMENT PARTICULAIRE, CONDUCTIBILITÉ DES CORPS POUR LA CHALEUR.

420. Le pouvoir qu'ont les corps d'émettre dans tous les sens de la chaleur rayonnante ne leur est pas départi à tous au même degré. Prenons un vase cubique dont les faces seront formées de métaux différents, ou recouvertes de substances diverses ; remplissons-le d'eau bouillante, et mettons-le en regard de l'une des extrémités de notre pile thermo-électrique. Si, sans changer sa distance à la pile, nous faisons tourner notre cube sur lui-même, et présentons successivement ses quatre côtés à l'appareil thermométrique, nous obtiendrons des résultats très-variables. Le noir de fumée, produisant sur la pile une élévation de température égale à 1, par exemple, le papier donnera 0,98 ; l'encre de Chine 0,88 ; le mercure 0,20 ; le plomb 0,19 ; le fer 0,15 ; l'étain, l'argent, le cuivre poli 0,12.

Réciproquement, lorsque de la chaleur rayonnante tombe à la surface d'un corps, cette chaleur pénètre dans

Pouvoir
émissif.

Pouvoir
absorbant.

l'intérieur du corps en quantité variable suivant la nature et l'état de sa surface. En général, le pouvoir absorbant d'un corps est égal à son pouvoir émissif. Chacun sait que, devant le feu ou au-dessus d'une lampe à alcool, les vases en métal poli s'échauffent beaucoup moins vite que les vases recouverts d'oxyde ou noircis par la fumée; mais aussi, une fois échauffés, ils gardent plus long-temps leur chaleur, ils se refroidissent plus lentement.

421. Le rayonnement des corps, très-évident quand ils sont chauds, n'est cependant pas limité à ce cas. Tout corps quel qu'il soit, et quelle que soit sa température, rayonne de la chaleur et en reçoit des corps voisins. Un échange mutuel s'effectue ainsi sans discontinuité. Les corps les plus chauds donnant aux corps froids plus de chaleur qu'ils n'en reçoivent, se refroidissent; les corps froids cédant moins de chaleur qu'ils n'en absorbent, s'échauffent. Ces deux phénomènes marchent ainsi de sens contraires jusqu'à ce que l'équilibre de température soit établi, c'est-à-dire jusqu'à ce que chaque corps reçoive des corps voisins autant de chaleur qu'il leur en envoie.

La vitesse avec laquelle un corps s'échauffe ou se refroidit par voie de rayonnement, croît avec sa conductibilité, § 422, et son pouvoir émissif ou absorbant; et avec l'excès de sa température sur celle des corps ambiants.

422. Le rayonnement n'est pas la seule voie par laquelle la chaleur puisse quitter un corps pour se porter sur d'autres. Un corps plongé dans l'eau plus chaude ou plus froide s'y échauffe ou s'y refroidit rapidement; il en est de même au sein de l'air, quoiqu'à un degré moindre. Ce corps nous paraîtra froid au toucher s'il augmente la quantité de chaleur qui nous est enlevée à chaque instant par voie de rayonnement ou par le contact de l'air; il nous semblera chaud, au contraire, s'il produit un effet inverse.

Transmission
de la chaleur
par contact.

Équilibre
mobile
de température.

Équilibre
de température.

Transmission
de la chaleur
par contact.

Transmission
de la chaleur.
par voie
de conductibilité.

Nous introduisons au milieu de charbons ardents l'extrémité d'une longue tige de fer ; la chaleur gagne de proche en proche jusqu'à l'extrémité la plus éloignée que bientôt nous ne pouvons plus tenir à la main ; nous pouvons toucher, au contraire, impunément un charbon à une petite distance de la portion incandescente. La chaleur se transmet donc avec une liberté très-inégale au travers des corps que l'on dit alors être plus ou moins bons conducteurs.

Les meilleurs conducteurs du calorique sont les métaux ; après viennent le marbre, le verre, la porcelaine ; enfin la brique, les poteries, et surtout le bois sec et le charbon.

Appareil
d'Ingenhouz.

On peut se faire une idée approximative du degré de conductibilité des corps au moyen de l'appareil d'Ingenhouz, qui se compose d'une caisse rectangulaire en cuivre mince sur l'un des

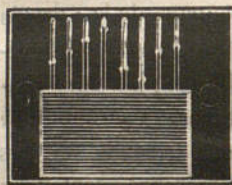


Fig. 277.

côtés de laquelle sont implantées sur une même ligne des tiges de même longueur, de même diamètre, mais de substances différentes. Recouvrons toutes ces tiges d'une couche

mince de cire, et versons dans la caisse de l'eau bouillante. La chaleur se transmettra au travers des tiges avec une inégale facilité, et nous verrons la cire fondre sur une étendue croissante avec la conductibilité de chaque substance.

423. La conductibilité des corps peut nous rendre compte de plusieurs phénomènes dont nous sommes journellement les témoins.

Pendant les froids de l'hiver, plaçons notre main sur diverses substances, des métaux, du marbre, des briques, du bois. Toutes ces substances seront à la même température, et cependant elles nous impressionneront très-inégalement. La chaleur transmise par notre organe à la

surface métallique pénétrera rapidement dans les couches inférieures, et sera remplacée par une nouvelle quantité de chaleur qui se diffusera à son tour; la perte sera donc rapide, prolongée, et l'impression de froid considérable. La surface du bois, au contraire, prendra bientôt la température de la main; et comme elle gardera sa chaleur, la perte sera faible, de courte durée, l'impression de froid peu sensible.

Les poêles en fonte chauffent rapidement, énergiquement, parce que la chaleur développée dans leur intérieur traverse aisément leurs parois; mais aussi ils se refroidissent vite. Les poêles en terre cuite s'échauffent et se refroidissent plus lentement; ils entretiennent une température plus douce et plus soutenue. Dans les pays froids, où l'homme a appris à lutter contre les rigueurs de la saison, les maisons et les édifices sont construits avec des matériaux mauvais conducteurs, la brique ou le bois, qui conservent mieux la chaleur intérieure pendant l'hiver, et garantissent plus efficacement des chaleurs de l'été.

424. Les liquides, à l'exception du mercure, sont très-mauvais conducteurs; aussi n'est-ce pas par voie de conductibilité qu'on les échauffe. On a toujours soin de les exposer au feu par leur partie inférieure ou latérale. La paroi chaude du vase qui les contient transmet le calorique à la couche liquide directement en contact avec elle; celle-ci se dilate, devient moins dense, s'élève dans la masse liquide, et est remplacée par de nouvelles couches froides qui s'échaufferont à leur tour pour faire place à d'autres.

Conductibilité
des liquides.

425. Les gaz s'échauffent et se refroidissent, comme les liquides, par l'effet des courants intérieurs qui s'établissent dans leur masse et qu'il est à peu près impossible d'éviter. L'expérience montre toutefois que la propriété qu'ont les gaz de refroidir les corps chauds qu'ils enveloppent, décroît

Conductibilité
des gaz.

rapidement avec la mobilité de leurs particules , et que leur conductibilité propre est à peu près nulle. C'est ce qui explique les propriétés bien connues des substances filamenteuses , la laine , le coton , la plume , l'édredon , les fourrures...., propriétés qu'il faut rattacher surtout au peu de conductibilité de l'air que ces substances renferment et qu'elles gênent dans ses mouvements.

Rayonnement
particulaire.

426. La transmission de la chaleur au travers des corps est encore un phénomène de rayonnement. Chaque particule chaude ou froide rayonne vers les particules voisines qui rayonnent à leur tour vers elle , et un échange de chaleur a lieu entre elles d'une manière continue comme entre des corps situés dans la même enceinte. Le rayonnement calorifique , surtout s'il émane d'une source à température très-élevée , se transmet facilement au travers des substances diathermanes qu'on pourrait dire élastiques pour le mouvement thermique ; il est arrêté par les substances non diathermanes et mauvais conducteurs qui seraient , au contraire , peu ou point élastiques pour la chaleur. Les corps bons conducteurs doivent peut-être leur adiathermanéité à ce que leurs particules matérielles , participant aisément du mouvement calorifique qui a pour agent de transmission l'éther , absorbent pour ainsi dire rapidement ce mouvement.

LIVRE NEUVIÈME.

NOTIONS DE MÉTÉOROLOGIE (1).

CHAPITRE I^{er}.

CHALEUR TERRESTRE.

427. L'examen des faits géologiques a conduit à cette opinion aujourd'hui généralement admise, que la terre a été jadis dans un état d'incandescence et de fusion. Une grande partie de cette énorme quantité de chaleur s'est dispersée dans les espaces interplanétaires, et son départ de noble globe a donné naissance à des phénomènes d'un grand intérêt. Le refroidissement s'opérant par la surface, une croûte solide s'est formée autour du noyau central resté liquide jusqu'à nos jours, et l'enveloppe comme d'un vêtement qui l'abrite du froid extérieur. Cette croûte solide a d'abord perdu de sa chaleur propre; elle se contractait à mesure que sa température baissait, tandis que le noyau central conservait notablement son volume. Cet immense vase clos de toutes parts devenait donc trop petit pour la masse liquide qu'il tenait enserrée; il a dû éclater à certaines époques, et d'énormes quantités de matière en fusion se sont écoulées par les fractures et déversées à sa surface. Par les progrès du refroidissement, ces matières se sont solidifiées à leur tour; elles ont cicatrisé les plaies

Chaleur propre
du globe.Causes
des révolutions
du globe.1^{re} Période.

(1) Voir la météorologie de Kaemtz, traduite par M. Martins.

de la croûte terrestre, rétabli sa continuité, jusqu'à ce que la même cause, reprenant son cours, ait ramené le même phénomène.

2^me Période.

428. Mais il est arrivé une époque où l'équilibre des températures s'est trouvé constitué dans l'enveloppe solide, et où la plus grande partie de la chaleur perdue a été fournie par le noyau central : les phénomènes ont alors changé d'aspect.

Un lac immense est mis en communication avec un canal de plusieurs centaines de mètres fermé à son extrémité. L'eau est au même niveau et dans le lac et dans les divers points du canal. Nous ouvrons alors celui-ci ; l'eau qu'il contient s'écoule d'abord en partie ; mais quand la pente s'est établie à sa surface, et s'est transmise jusqu'au lac, l'écoulement s'effectue surtout aux dépens des eaux de celui-ci, et le niveau ne varie plus dans le canal qu'à mesure qu'il varie dans le lac lui-même. C'est ce qui a lieu pour la chaleur terrestre.

Dans ces conditions qui existent de nos jours et qui existent sans doute depuis une longue série de siècles, c'est sur le noyau central que s'est fait surtout sentir l'action du refroidissement. Ce noyau s'est donc contracté plus vite que l'enveloppe qui le recouvre, et il s'est présenté des époques où celle-ci, imparfaitement soutenue, s'est plissée de manière à suivre ainsi les décroissements de volume de la masse liquide. Ces plissements se sont accompagnés de ruptures de la croûte solide, et de rebroussements des bords de la plaie. Les causes des phénomènes géologiques ont donc été nécessairement doubles, mais il est sans doute difficile d'établir nettement la limite où l'une d'elles a cessé pour faire place à l'autre. Les déchirures suivies d'éruptions plutoniques ont pu être accompagnées de soulèvements déterminés par le courant des matières fondues ; à la suite des

plissements produits sous l'influence de la seconde cause, des fragments de l'enveloppe solide n'étant plus soutenus par la cohésion du système, ont pu plonger dans la masse fluide, et faire monter celle-ci à leur surface. Cependant, dans la série des époques géologiques, il doit s'en présenter où l'un de ces deux ordres de faits prédomine nettement sur l'autre. Grâce à l'atmosphère, second vêtement qui a une large part dans la conservation de la chaleur terrestre; grâce à l'influence du soleil qui verse chaque année une énorme quantité de chaleur à la surface de notre globe, le refroidissement de la terre est aujourd'hui d'une lenteur extrême; mais la cause la plus puissante des révolutions du globe n'en est pas moins permanente, n'en agit pas moins sourdement sous nos pas.

429. La température de la surface de la terre varie à chaque instant du jour et de l'année; mais si nous descendons à une profondeur de 20 à 30 mètres, nous rencontrons bientôt une couche où la température est constante. Les variations diurnes ou annuelles de température ne vont pas au-delà. Plus avant, cette température qui, à Paris, dans les caves de l'Observatoire, est de $11^{\circ},82$, s'élève graduellement de 1 degré par 30 mètres environ. Ainsi les eaux jaillissantes du puits de Grenelle, qui viennent d'une profondeur de 548 mètres, ont une température constante de $27^{\circ},7$, ce qui correspond à un accroissement de 1 degré par 33 mètres.

430. La température de l'air au niveau du sol passe chaque jour par un *maximum* et par un *minimum*. Le minimum a lieu un peu avant le lever du soleil dans nos climats; le maximum a lieu vers deux heures, un peu plus tôt en hiver, un peu plus tard en été. Ces oscillations thermométriques sont dues au concours inégal de deux causes opposées, le rayonnement des corps terrestres, et

Variation
de la
température
avec
la profondeur.

Variation
diurne
de la chaleur
à la surface
du globe.

le rayonnement du soleil. Lorsque le soleil est au-dessus de l'horizon, il agit d'autant plus sur la terre et sur les couches inférieures de l'atmosphère, que sa hauteur angulaire est plus considérable ; une partie de cette chaleur pénètre dans le sol, l'autre se perd en rayonnant dans l'atmosphère ou les espaces célestes. Avant midi, le sol reçoit plus de chaleur qu'il n'en perd par rayonnement ; sa température s'élève, et cet effet se continue plusieurs heures après midi ; à mesure que le soleil s'abaisse vers l'horizon, son action devient moins puissante, le rayonnement devient prépondérant, la température baisse, et cet effet dure toute la nuit. En faisant la somme des températures aux diverses heures de la journée, et divisant par 24, on a la température moyenne du jour.

Variations
annuelles.

Un effet analogue se produit dans le cours de chaque année. En hiver, les nuits sont longues, les jours courts, et le soleil ne s'éloigne jamais beaucoup de l'horizon : la perte l'emporte sur le gain. En été, au contraire, les nuits sont courtes, les jours longs, et le soleil s'élève de plus en plus : le gain l'emporte sur la perte. Aussi la température moyenne des vingt-quatre heures atteint-elle un maximum le 26 Juillet, un minimum le 14 Janvier. L'hiver comprend donc réellement les mois de Décembre, Janvier et Février, et l'été les mois de Juin, Juillet, Août, le printemps et l'automne les mois intermédiaires.

Lignes
isothermes.

En faisant la somme des températures moyennes des 365 jours de l'année, et divisant par 365, on a la température moyenne de l'année.

431. M. De Humboldt, en 1817, a le premier réuni et discuté une foule d'observations de températures moyennes recueillies dans les diverses parties du globe ; puis, prenant les points où la température moyenne est la même, il les a réunis par des lignes appelées *isothermes*. L'inspection de

ces lignes est d'un très-haut intérêt pour l'étude de la distribution de la chaleur à la surface de la terre. Les isothermes sont loin d'être régulières et parallèles à l'équateur, et leur irrégularité s'accroît de l'équateur vers les pôles. Le caractère général des sinuosités qu'elles présentent peut se résumer rapidement ainsi qu'il suit. Dans la partie occidentale de l'Europe, les lignes isothermes sont fortement convexes vers le nord ; la température y décroît moins rapidement que partout ailleurs à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur. Il en est à peu près de même, quoique à un moindre degré, dans la région opposée ; en sorte que les isothermes projetées sur le plan de l'équateur forment des courbes aplaties à peu près dans la direction du méridien de Paris, et allongées, au contraire, dans la direction perpendiculaire à la précédente.

La température moyenne de l'équateur varie de 28 à 30° sur les divers points de l'équateur ; plus élevée au milieu des continents, elle paraît être de 28° sur toute l'étendue des mers situées sous l'équateur. L'isotherme de 12°,5 passe par St-Malo, latitude 48°39', par Philadelphie, latitude 40°40', par New-York, latitude 39°56'. L'isotherme de -5° commence probablement vers l'embouchure du fleuve Mackensie, dans l'intérieur du continent d'Amérique, atteint son point le plus méridional vers 92° de longitude et 52 de latitude N. ; elle passe ensuite par les parties septentrionales du Labrador, coupe la côte occidentale du Groënland, à la hauteur du cercle polaire, et s'élève au-dessus du Spitzberg ; puis redescend au-dessous du parallèle 62°, vers la région orientale de la Sibérie.

De nombreuses causes produisent ces inflexions des isothermes ; parmi les principales nous citerons la configuration des continents et des mers, et les grands courants

Climats.

marins et aériens qui ont leur origine à l'équateur et se déversent ensuite vers les régions polaires.

432. La température moyenne de l'année ne suffit pas pour faire apprécier exactement la nature d'un climat : il faut encore indiquer les limites entre lesquelles varient les températures de l'hiver et de l'été. Ces limites sont quelquefois très-éloignées, comme l'indique le tableau suivant :

Lieux.	Moyenne de l'hiver.	Moyenne de l'été.	Différence.
Feroé	3,90	11,60	6,70
Londres	3,22	16,75	13,53
Paris	3,59	18,01	14,42
Berlin	1,01	17,18	18,19
Vienne	0,08	20,36	20,18
Pétersbourg . . .	-8,70	15,96	24,66
Jakouzk	-38,90	17,20	56,0

Climats marins.

Climats excessifs.

La température de la mer variant peu de l'été à l'hiver, les climats des îles ou des parties des continents voisines des mers seront peu variables (climat marin). Les climats dans l'intérieur des grands continents sont, au contraire, très-variables (climats excessifs). D'une manière générale encore, la température de l'été varie moins en remontant vers le nord que la température de l'hiver, comme le montrent les derniers nombres du tableau précédent.

Décroissement de la température à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère.

433. Mille circonstances locales influent encore sur la nature du climat d'un lieu donné. Ainsi l'élévation au-dessus du niveau de la mer produit un effet analogue à celui qui est dû à un rapprochement des pôles. On sait, en effet, qu'il existe des neiges perpétuelles dans toutes les parties du globe et jusque sous la zone torride, à une hauteur d'autant plus grande cependant que l'on se rapproche davantage de l'équateur.

Toutes les expériences faites, soit en s'élevant dans des ballons, soit en gravissant les montagnes, ont conduit à ce résultat que la température décroît rapidement à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère. La loi de ce décroissement n'a pu être déterminée jusqu'à ce jour. L'air est, en effet, soumis à tant de causes accidentelles d'agitation et de mouvement, il s'y passe tant de phénomènes inattendus, qu'il est facile de comprendre l'impossibilité où l'on se trouve d'en analyser les effets. On peut cependant admettre qu'il est en moyenne de 1° par 150 à 200^m d'élévation.

CHAPITRE II.

DES VENTS.

434. L'inégale distribution de la chaleur à la surface du globe et dans les divers points de l'atmosphère, donne lieu, au sein de celui-ci, à des courants d'air, à des vents tellement inconstants, tellement variables dans leur direction, dans leur intensité, tellement compliqués en apparence dans leurs causes individuelles, qu'il semble impossible à la science d'aborder ce sujet. Considérés dans leur ensemble, on peut cependant les rattacher à des lois peu nombreuses que nous allons essayer d'indiquer.

Cause générale
des vents.

Les régions équatoriales, soumises à l'action continue d'un soleil brûlant, sont toujours douées d'une température très-élevée; les régions polaires sont, au contraire, toujours glacées. L'équilibre est impossible dans ces conditions; des courants très-actifs s'élèvent donc des régions équatoriales, et, arrivés dans les parties supérieures de l'atmosphère, se déversent dans les deux hémisphères pour aller gagner les pôles, tandis que des courants contraires, partant des

régions polaires et rasant la surface du sol, viennent remplacer l'air chaud qui a quitté la zone torride. Si la terre était en repos, nous aurions donc, dans notre hémisphère, des courants supérieurs allant du sud au nord, et des courants inférieurs allant du nord au sud. La rotation de notre planète autour de son axe vient modifier ces résultats. Tous les points de la terre exécutant leur révolution dans le même temps, leur vitesse de l'occident à l'orient est d'autant plus grande que le cercle qu'ils décrivent est plus grand lui-même, qu'ils sont plus éloignés des pôles et plus près de l'équateur. Les courants d'air qui partent de l'équateur sont donc animés, par rapport aux régions qu'ils envahissent et dans le sens de l'O. à l'E., d'un excès de vitesse qui change leur direction et les fait marcher non plus du S. au N., mais du S.-O. au N.-E. La même raison fait incliner les courants inférieurs vers l'O., et les fait marcher du N.-E. au S.-O. En s'approchant de l'équateur à partir du 30^{me} degré de parallèle, on trouve, en effet, peu de changements dans la direction des vents; ils varient du N.-N.-E. au N.-E. ou à l'E.-N.-E. Dans le voisinage de l'équateur, ils sont à l'E. Sur cette ligne, les vents réguliers des deux hémisphères se rencontrent et se combinent; leurs vitesses perpendiculaires à l'équateur s'annulent mutuellement, leur vitesse parallèle à l'équateur persiste seule. Telle est l'origine des vents *alisés* qui soufflent avec tant de régularité sur les deux grands Océans.

Vents alisés.

Si les *alisés* supérieurs ont été moins étudiés parce qu'ils ont une action moins directe sur la marche des navires, leur direction du S.-O. au N.-E., dans notre hémisphère, a été néanmoins souvent constatée par les observateurs. Ainsi, le 25 Février 1835, les cendres lancées par le volcan de Cosiguèna, dans l'état de Guatimala, après avoir obscurci pendant cinq jours l'éclat du soleil, et s'être élevées

dans l'alisé supérieur, tombèrent, quelque temps après, dans les rues de Kingston, à la Jamaïque, située au N.-E. de Guatemala.

Des circonstances locales viennent cependant modifier ces effets généraux. Sous la ligne, en effet, l'intensité des courants ascendants vient habituellement neutraliser les vents d'E. Aussi rencontre-t-on, dans ces parages, des calmes plats qui ne sont troublés que par des orages presque journaliers, et des coups de vent appelés *tornados* ou *travaños*, par les Espagnols et les Portugais. Dans l'Océan-Indien et sur les côtes de l'Amérique ou de l'ancien continent, le voisinage des terres modifie également ces courants réguliers; l'inégale température de la terre et de l'eau donnera naissance, dans l'Océan-Indien, aux *moussons*, mot dérivé du malais *moussin* qui veut dire saison; dans la Méditerranée, aux vents désignés déjà, par les anciens, du nom d'*étésiens*, de *ἔτος*, année. Les mêmes causes produisent les brises de mer qui s'élèvent vers neuf ou dix heures du matin, atteignent leur maximum de force et d'étendue vers deux ou trois heures, puis décroissent et font place aux brises de terre qui s'élèvent généralement peu après le coucher du soleil, et s'accroissent jusqu'à son lever.

Sous l'influence des mêmes causes, de semblables brises prennent naissance au milieu des montagnes et sont soumises aux mêmes lois.

435. Dans nos régions tempérées, la lutte des deux courants supérieurs et inférieurs qui se mêlent, la prédominance des causes locales, produisent d'incessantes variations dans la direction et l'intensité des vents. Les vents amènent des pluies, des orages, des variations considérables de température: ces effets, à leur tour, produisent des vents, et cet enchevêtrement des effets et des causes

Région
des calmes.

Moussons.

Étésiens.

Brises.

Vents
dans
les régions
tempérées.

rend les phénomènes compliqués et difficiles à classer. Nous pouvons dire toutefois, d'une manière générale, que, si deux régions plus ou moins voisines sont inégalement échauffées, il se produira dans les régions supérieures un vent allant de la région chaude à la région froide, et à la surface du sol un courant contraire ; mais celui-ci, pris entre deux obstacles, est facilement ralenti et absorbé par le courant supérieur. La prédominance des vents S.-O. et N.-E. est encore manifeste en France, ainsi qu'il résulte du tableau suivant dans lequel nous avons exprimé la fréquence relative des vents principaux à Paris.

N. 126, N.-E. 140, E. 84, S.-E. 76, S. 117, S.-O. 192, O. 155, N.-O. 110. Le résultat est tout autre à Montpellier.

N. 106, N.-E. 168, E. 158, S.-E. 75, S. 82, S.-O. 28, O. 94, N.-O. 199. Les qualités des vents varient suivant la région d'où ils soufflent. Dans nos pays, les vents du nord et de l'est sont en général froids et secs ; les vents du sud et de l'ouest sont, au contraire, relativement chauds et humides. Ces résultats changent avec les pays.

436. Les vents qui sont le résultat de l'inégale distribution de la chaleur à la surface du sol, modifient profondément à leur tour la température des divers points du globe.

Les alisés transportent sans cesse vers les pôles l'air échauffé sous l'équateur, et ramènent à l'équateur l'air froid des pôles. D'un autre côté, la mer, dont la capacité calorifique est considérable, et dont l'agitation est perpétuelle, s'échauffe en été beaucoup moins que le sol, et se refroidit aussi beaucoup moins en hiver. De là l'uniformité de la température dans les îles et sur le bord des mers, et l'excessive inégalité des saisons dans les pays situés au milieu des grands continents.

Les phénomènes de transport que nous observons au sein de l'atmosphère se retrouvent en partie dans les mers : des

Qualités
des vents.

Influence
des courants
aériens ou marins
sur la
température
des
divers points
du globe.

courants superficiels s'établissent de l'équateur vers les pôles, tandis que d'autres courants ont lieu des pôles vers l'équateur. Les alisés viennent ajouter leur influence à celle de la chaleur, et les résultats de leur action combinée sont modifiés encore par la configuration des mers et des continents.

L'alisé, qui souffle régulièrement sur l'Atlantique, pousse vers l'ouest une masse d'eau considérable. Ce courant occidental arrivé au cap St-Roch, se divise en deux branches dont l'une descend vers le sud, tandis que l'autre remonte vers le nord en longeant la côte E. de l'Amérique; puis il entre dans le golfe du Mexique, se précipite dans le canal de Bahama, et de là remonte vers le nord sous le nom de *Gulfstream*. Cette masse d'eau, exposée long-temps au soleil ardent des tropiques, a une température de plus de 27° au sortir du golfe du Mexique, et son action calorifique se fait vivement sentir sur les côtes du Danemarck et jusqu'au Spitzberg. Aussi remarque-t-on sur tout son trajet une élévation très-notable des isothermes vers le nord. Un courant venant du nord descend, au contraire, le long de la côte d'Afrique; et quoique sous la même latitude, les Florides sont de 1 à 2° plus chaudes que les Canaries.

Gulfstream.

CHAPITRE III.

DES MÉTÉORES AQUEUX.

437. La quantité d'eau contenue dans l'atmosphère est essentiellement variable, pour chaque lieu, avec la température, avec la direction du vent régnant, avec toutes les conditions météorologiques. Cette quantité, prise d'une manière absolue, n'est pas toutefois l'élément le plus important que

Humidité
de l'air.

nous ayons à considérer : ainsi en été, par un beau jour, l'air nous paraît plus sec qu'en hiver par un temps couvert et brumeux ; cependant il contient, dans le premier cas, cinq ou six fois plus de vapeur d'eau que dans le second. L'air est humide pour nous lorsqu'il est presque saturé, c'est-à-dire lorsqu'il contient presque toute la quantité de vapeur qu'il peut renfermer : or, cette quantité est très-variable avec la température. 1 mètre cube d'air peut dissoudre à

—20°.....	1,38 d'eau.	10°.....	10,57
—10.....	2,87	20.....	18,77
0.....	5,66	30.....	31,93

L'air nous semblera humide à -10° s'il contient 2g,5 de vapeur d'eau par mètre cube ; à 20° il devrait en contenir 18 pour produire le même effet. L'humidité météorologique ou l'état hygrométrique de l'air est donc le rapport qui existe entre la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air et celle qu'il contiendrait s'il était saturé. Cette dernière quantité est ordinairement représentée par 100, et l'humidité relative par des nombres inférieurs, mais ordinairement compris entre 60 et 90.

État
hygrométrique.

Psychromètre
d'August.

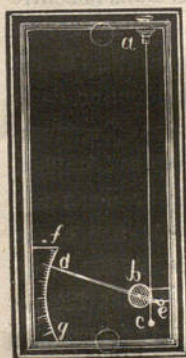
438. Le meilleur instrument hygrométrique, à cause de la régularité de ses indications et de la facilité avec laquelle on l'observe, est le psychromètre d'August de Berlin. Il se compose de deux thermomètres parfaitement semblables, disposés très-près l'un de l'autre, et dont le réservoir est recouvert d'une gaze que l'on renouvelle souvent. Quelques fils partent du réservoir de l'un de ces thermomètres, et vont plonger dans un godet où ils se mouillent d'eau distillée. L'action capillaire amène ainsi sur l'enveloppe thermométrique la quantité de liquide nécessaire pour compenser toujours ce qui est emporté par l'évaporation. Le thermomètre sec donne la température à l'air ; le thermo-

mètre humide, refroidi par l'évaporation qui s'effectue à sa surface, indique une température plus basse. De la différence de ces deux températures, on conclut l'humidité absolue et relative à l'aide de tables données par M. August, et vérifiées et corrigées expérimentalement par M. Regnault.

L'appareil hygrométrique le plus répandu en France, malgré ses incertitudes, est l'hygromètre de De Saussure. Un cheveu préalablement lavé à l'éther pour le dépouiller des substances grasses dont il est naturellement enveloppé, est suspendu verticalement dans un cadre métallique. Son

Hygromètre
à cheveu
de De Saussure.

Fig. 278.



extrémité supérieure est prise dans une pince en cuivre *a*; son extrémité inférieure enroulée sur la gorge d'une petite poulie *b* munie d'une aiguille *d* mobile sur les divisions d'un cercle gradué. Un contre-poids *e* tend le cheveu d'une manière constante.

Quand l'air se dessèche, le cheveu perd de son eau hygrométrique; il se raccourcit; l'aiguille descend et marche au sec. Si l'humidité relative de l'air augmente, le cheveu reprend l'eau qu'il avait perdue; il s'allonge; l'aiguille remonte vers le point 100° degré de l'humidité extrême ou de la saturation de l'air. Cet instrument serait précieux par la simplicité de ses indications, s'il n'était soumis à de nombreuses causes d'erreur ou de détérioration qui rendent son emploi toujours très-incertain. L'hygromètre à cheveu ne donne que l'humidité relative, le degré hygrométrique; il doit être accompagné d'un thermomètre quand on veut évaluer la quantité absolue d'eau contenue dans l'air.

L'humidité relative varie à toutes les heures, on pourrait dire à tous les instants de la journée. Elle est à son maximum

Variations
du degré
hygrométrique
de l'air.

avant le lever du soleil, à son minimum au milieu du jour ; elle est différente aux divers mois de l'année, plus grande en hiver qu'en été. Sur les côtes, l'air est, toutes choses égales d'ailleurs, plus humide que dans l'intérieur des continents : c'est dans les steppes, les déserts et les pampas que l'on a observé les plus grandes sécheresses connues. L'air est aussi quelquefois d'une sécheresse extrême sur les montagnes ; mais, en moyenne, il y est plus humide que dans la plaine.

L'humidité relative varie aussi suivant les vents, leur température et les lieux qu'ils ont parcourus. Dans le centre de l'Allemagne, en hiver, le vent le plus sec est le vent d'O., l'E. le plus humide ; en été, au contraire, l'O. est le plus humide, et l'E. le plus sec. La distribution de la chaleur à la surface du globe rend compte de ces différences. Les vents les plus froids sont en général les plus humides.

439. Un air à 20° contient 12^g de vapeur d'eau par mètre cube : il n'est pas encore humide. Par une cause quelconque, sa température descend à 10°. A 10°, l'air saturé ne contient que 10^g,57 de vapeur d'eau. Nos 12^g ne pourront donc pas conserver l'état de vapeur ; 1^g,43 passera à l'état liquide. C'est ce qui arrive l'été, quand une carafe d'eau froide est apportée dans un appartement. L'air qui l'enveloppe, refroidi par son contact avec elle, dépose à sa surface une partie de la vapeur qu'il renfermait ; et comme il est sans cesse renouvelé, le dépôt s'accroît de plus en plus. Une cause analogue produit la rosée, la gelée blanche. Pendant les nuits sereines, les corps terrestres, la terre, le gazon, les feuilles, se refroidissent par rayonnement plus que l'air en contact avec eux. Quand la différence de température est assez grande relativement au degré d'humidité de l'air, la rosée apparaît ; et si la température des corps descend au-dessous de 0°, la vapeur se solidifie à

Condensation
de la vapeur
d'eau
contenue
dans l'air.

Rosée.

Gelée blanche.

mesure qu'elle se dépose; elle cristallise et forme la gelée blanche.

Quand c'est au sein de l'air que l'abaissement de température s'effectue, le phénomène change d'aspect : des brumes ou des nuages prennent naissance. Un air très-humide pendant la chaleur du jour donnera, le soir, le serein, petite pluie fine qui prend naissance dans les régions inférieures de l'atmosphère à la surface du sol; ou des brouillards, espèces de nuages qui nous enveloppent. Dans les régions élevées, les brouillards prennent le nom de nuages. Leurs formes sont alors très-variables; cependant Howard en a distingué quatre types principaux.

Serein.

Brouillards.

1^o Les *stratus*, nuages allongés formant des bandes parallèles à l'horizon. L'aspect de ces nuages tient à leur position et à l'angle sous lequel on les aperçoit.

Nuages.

2^o Les *cirrus* ou queues-de-chat des marins, nuages semblables à des flocons de laine très-légers ou à un réseau très-délié. Ce sont les nuages les plus élevés; leur hauteur n'est jamais au-dessous de 5000 mètres: Kaemtz l'a trouvée généralement de 6500. Ils sont probablement presque toujours composés de neige. Amenés par les vents du S. ou S.-O., ils annoncent en général la pluie.

3^o Les *cumulus* ou nuages d'été, aux formes arrondies, imitant les montagnes couvertes de neige. Ces nuages sont formés de vapeurs qui sont entraînées dans les régions supérieures de l'atmosphère par les courants ascendants. Leur hauteur est variable, et souvent ils deviennent le foyer d'où sortent les orages d'été.

4^o Les *nimbus* sont ces nuages noirs étendus, en général assez bas, et chargés de pluie, de grêle, de grésil, et quelquefois d'éclairs et de tonnerre.

Ces quatre espèces de nuages pourraient peut-être se réduire à deux : les *cirrus* et les *cumulus*.

Vésicules
des nuages.

440. L'eau, dans les brouillards et les nuages, se trouve à un état particulier, l'état *vésiculaire*. Les vésicules sont de petits globules d'eau, creux à l'intérieur comme des bulles de savon. Le diamètre de ces globules varie de 0^{mm},035 en Décembre, à 0,014 en Août, d'après Kaemtz, et leur épaisseur est d'environ 0^{mm},006 d'après Kratzenstein. Ces résultats expliquent comment ces vésicules peuvent se soutenir ainsi qu'elles le font au sein de l'air, avec le concours des courants qui existent toujours dans l'atmosphère. Il ne faudrait pas croire, au reste, que les nuages soient réellement immobiles : tantôt les vésicules descendent et disparaissent dans les couches inférieures, tandis que le nuage se renouvelle par la formation de nouvelles vésicules à sa partie supérieure ; tantôt l'effet inverse a lieu sous l'influence des courants ascendants. En général, les nuages s'élèvent dans le jour, comme les brouillards, et se rapprochent de la terre le soir et pendant la nuit.

Pluie.

Lorsque, dans leur contact, les vésicules se crèvent, se réunissent en gouttes pleines, elles tombent sous forme de pluie. Les gouttes alors accroissent, en général, en volume à mesure qu'elles approchent du sol ; mais quelquefois l'inverse a lieu, surtout dans les premiers moments où le phénomène apparaît.

Neige.

Un refroidissement plus intense peut faire passer la vapeur directement à l'état solide et cristallin : la pluie alors est remplacée par de la neige. Les flocons de neige sont toujours formés par la réunion de cristaux très-fins, de formes très-régulières, mais aussi très-variables avec la température, l'état hygrométrique de la région où ils se forment, l'intensité et la direction du vent. Ces cristaux sont ordinairement en cônes, en étoiles, en lamelles. La neige tombe rarement par les grands froids ; elle est alors

très-fine. On observe les gros flocons quand la température est voisine de 0°.

441. La distribution des pluies dans les différentes saisons est extrêmement remarquable. Entre les tropiques, la saison des pluies suit le cours du soleil; sous l'équateur même elle est double, et survient aux deux équinoxes. Dans ces régions, les pluies sont dues aux courants ascendants; elles sont torrentielles, quotidiennes, arrivant ordinairement dans la seconde moitié du jour quand elles ne sont pas continues. Vers le tropique nord, la saison des pluies devient unique et correspond à notre *été*. Dans notre hémisphère au-dessus du tropique, elle est également unique, mais *hivernale*. Dans l'espace compris entre ces deux régions où les saisons pluviales sont uniques et opposées, il ne pleut presque jamais: c'est la zone des déserts. Dans l'hémisphère sud a lieu un phénomène analogue, mais inverse.

Ces résultats généraux sont considérablement modifiés par les influences locales dans nos régions tempérées. A mesure que l'on s'avance du tropique vers le nord, la saison des pluies se partage en deux saisons qui s'éloignent de plus en plus, mais qui en même temps s'effacent davantage. A Montpellier, elles sont encore assez bien caractérisées, et correspondent en général à la fin de l'automne et au commencement du printemps; l'été y est très-sec, l'hiver beaucoup moins. Plus au nord, il pleut dans toutes les saisons, sous l'influence de la mobilité continue des vents; on y retrouve cependant encore des traces de l'influence des saisons, ainsi qu'il résulte du tableau suivant où est écrite en centièmes de la quantité totale d'eau annuelle celle qui tombe dans chaque saison.

Distribution
des pluies
à la surface
du globe.

Zone
des déserts.

SAISONS.	ANGLETERRE occidentale.	FRANCE occidentale.	FRANCE orientale.	ALLEMAGNE.
Hiver	26,4	23,4	19,5	18,2
Printemps..	19,7	18,3	23,4	21,6
Été	23,0	25,1	29,4	37,1
Automne ..	30,9	33,3	27,3	23,2

L'Inde est le pays où il tombe le plus d'eau; la terre y reçoit par an, de Juin à Décembre, 7^m,77; à La Guadeloupe, cette quantité est de 7^m,30. Dans l'Europe, Madrid paraît être la ville où il pleut le moins, 0^m,25 par an; Bergen, en Norvège, celle où il pleut le plus, 2^m,24 par an. A Paris, la quantité d'eau annuelle est d'environ 0^m,546; et à Montpellier, où le nombre des jours pluvieux est cependant moindre qu'à Paris, elle a varié de 0,781 à 0,644 dans l'espace d'un siècle.

CHAPITRE IV.

DES VARIATIONS BAROMÉTRIQUES.

442. Les vents modifient d'une manière singulière la pression exercée par l'atmosphère à la surface du sol, et, par suite, la hauteur de la colonne barométrique qui lui sert de mesure. En dehors de toute cause perturbatrice, le baromètre est sujet à une variation diurne analogue à celle du thermomètre. A l'équateur, cette variation est très-grande et d'une régularité telle que, suivant l'expression de M. de Humboldt, on pourrait connaître l'heure d'après la hauteur du baromètre. Les ouragans les plus violents, les orages les

Variations
barométriques.
Variations
diurnes.

plus terribles, y font, au contraire, à peine baisser le baromètre de quelques millimètres. Il n'en est plus ainsi dans nos régions tempérées où la variation diurne est complètement masquée par des mouvements accidentels et irréguliers. Une longue série d'expériences la laisse cependant entrevoir ; et on peut dire d'une manière générale que, dans nos pays, le baromètre baisse depuis midi jusqu'à 4 ou 5 heures du soir ; qu'il remonte et atteint sa plus grande hauteur entre 9 et 11 heures du soir pour baisser de nouveau jusqu'à 4 heures du matin, et remonter jusqu'à 10 heures. A mesure que l'on s'élève vers l'atmosphère, ces oscillations s'affaiblissent et s'éteignent.

La variation barométrique annuelle est aussi incertaine et voilée ; elle paraît cependant plus forte en hiver qu'en été : son maximum correspondrait au mois de Février, et son minimum au mois d'Octobre.

443. Les vents sont la cause la plus influente des variations barométriques dans nos contrées. A Paris, en moyenne, c'est par le N. 24° E. que le baromètre est le plus haut, par le S. 5° O. qu'il se tient le plus bas ; mais ces résultats varient avec les saisons. En hiver, le maximum et le minimum correspondent au N. et au S.-S.-O. ; en automne, au N.-O. et au S.-S.-O. ; au printemps, au N.-E. et au S.-S.-E. D'une manière générale, le baromètre monte quand les vents soufflent de l'intérieur des continents ; il baisse quand les vents soufflent de l'équateur ou de la mer.

Ces faits nous expliquent l'intérêt que l'on accorde vulgairement, en France, aux variations barométriques comme pronostics du temps. La hausse ou la baisse du baromètre accusent des changements de vents et non des changements de temps ; mais la pluie étant le plus souvent amenée par le S.-O. à Paris, ses prophéties y sont le plus souvent réalisées. A Pétersbourg, où il pleut indifféremment par

Variations
annuelles.

Influence
des vents
sur la hauteur
du baromètre.

tous les vents, ses indications sont sans valeur. Supposons que le vent du N. règne dans l'atmosphère : si le baromètre commence à baisser, on pourra annoncer avec une grande probabilité qu'il sera remplacé par un vent de S.-O.; souvent même on remarque déjà qu'il souffle dans les hautes régions de l'atmosphère. Ce vent étant chargé de vapeur, la pluie est probable; mais elle peut aussi être amenée par un vent du N. Supposons, en effet, que le S.-O. souffle et que le temps soit beau, le vent du N. s'établit peu à peu; le baromètre commence à monter; mais l'atmosphère chargée de vapeurs se refroidit en même temps, les vapeurs se condensent et la pluie tombe. C'est un des cas nombreux où le baromètre est accusé de mensonge. Il paraît qu'à Paris il mérite cette accusation environ une fois sur cinq. Les cultivateurs, qui ont un grand intérêt à prévoir les changements de temps, ne consultent pas le baromètre seul; quelques-uns acquièrent une telle intelligence des divers signes météorologiques, qu'ils se trompent beaucoup moins souvent.

Les variations brusques et considérables du baromètre ont une signification plus positive. Les orages et les coups de vent sont, en effet, toujours précédés d'une baisse barométrique d'autant plus forte qu'on s'éloigne plus de l'équateur. Dans une grande tempête qui parcourut une partie de l'Europe, en Février 1783, le baromètre baissa considérablement sur tous les points parcourus par la tempête : ainsi, dans le centre de l'Angleterre, il descendit de 31^{mm}; en France, en Allemagne, de 11 à 30, et à Rome, de 7^{mm} seulement.

CHAPITRE V.

PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES DE L'ATMOSPHÈRE.

444. L'évaporation qui s'effectue à la surface du sol introduit sans cesse des quantités considérables d'électricité dans l'atmosphère ; aussi, par les plus beaux temps, quand le ciel est sans nuages, peut-on accuser l'existence de l'agent électrique au sein de l'air. Ce fait, constaté pour la première fois, en 1752, par Lemonnier, a été vérifié par De Saussure et par tous les physiciens qui se sont occupés de l'électricité atmosphérique.

Électricité
atmosphérique

445. Les procédés employés dans ces recherches sont assez variés ; le plus simple peut-être est dû à De Saussure. Cet habile physicien se servait d'un très-petit électromètre à balles de sureau surmonté par une tige métallique terminée en pointe aiguë, et longue de 30 à 40 centimètres. Après avoir mis cet électroscope à l'état naturel en le plaçant horizontalement au niveau du sol, il suffit de le redresser et de le porter au niveau de l'œil pour observer une déviation très-marquée dans les balles de sureau. Au lieu de la tige, on peut surmonter l'électroscope d'un petit plateau en cuivre sur lequel repose un fil conducteur contourné en hélice et terminé par une balle de plomb qu'on lance en l'air. A mesure que ce mobile s'élève, il est suivi par le fil qui se déroule sans frottement et abandonne bientôt totalement le plateau ; mais celui-ci reste chargé d'une certaine quantité d'électricité dont on peut constater aisément la nature.

Expérience
de De Saussure
sur l'électricité
atmosphérique.

Les principaux résultats établis par De Saussure sont les suivants :

Résultats
obtenus.

1° L'air serein, en rase campagne, loin des arbres et des maisons, sur les collines et sur les montagnes, est

toujours chargé d'électricité ; cette électricité , ordinairement positive , est quelquefois mais rarement négative.

2^o L'électricité atmosphérique varie dans le cours de l'année ; elle paraît être plus intense en hiver qu'en été.

3^o Elle varie aussi avec les périodes du jour. Elle atteint deux maximum : l'un quelques instants après le lever du soleil, l'autre quelques instants après son coucher. M. Quetelet fixe ces époques à 8 heures du matin et 9 heures du soir. Les deux minimum ont lieu à 3 heures de l'après-midi et pendant la nuit.

Électricité
pendant
les orages.

446. La régularité du phénomène est troublée par la présence des nuages au sein de l'atmosphère ; l'électricité change de signe quelquefois à plusieurs reprises dans le courant de la journée et même de quelques heures.

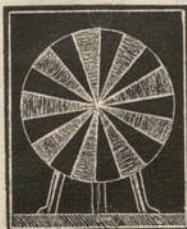
Nuages
orageux.

Les nuages orageux sont chargés de quantités d'électricité considérables, ainsi que l'ont prouvé Dalibard, Franklin, De Romas, Richman, etc.... De Romas ayant, en 1757, élevé dans les airs, pendant un orage, un cerf-volant dont la corde avait été garnie d'un fil métallique qui la rendit bon conducteur, vit sortir de l'extrémité inférieure du fil métallique des lames de feu de 3 à 4 mètres de long, et qui l'eussent infailliblement foudroyé, comme il arriva à Richman, s'il n'eût pas pris les précautions convenables.

Lorsqu'on est témoin d'un orage dans des lieux assez élevés pour qu'on puisse étudier convenablement le phénomène, on est frappé des mouvements extraordinaires dont sont animés les nuages. Transportés rapidement dans des directions différentes et souvent contraires, dès qu'ils arrivent en présence les uns des autres, ils s'arrêtent, tourbillonnent, se pelotonnent ou s'étalent, se déchirent, se repoussent ou se précipitent violemment les uns sur les autres, suivant qu'ils sont électrisés d'une manière semblable ou inverse. Quand ces phénomènes se produisent sur une grande étendue, on doit s'attendre à de violents orages.

447. Les décharges qui s'effectuent entre les nuages ou les parties de nuages électrisés sont, comme le départ de l'étincelle des machines, accompagnées de lumière et de bruit,

Fig. 279.



d'éclairs et de tonnerres. Mais les phénomènes acquièrent ici une intensité quelquefois prodigieuse. Les étincelles embrassent, en effet, quelquefois 5 ou 6 kilomètres de longueur. Toutefois, lorsqu'à l'aide de l'appareil décrit, § 249, nous cherchons à évaluer leur durée,

nous voyons qu'elle est beaucoup plus grande que ne le comporte la vitesse avec laquelle l'électricité se transmet dans l'espace. Ces étincelles démesurées doivent donc être considérées comme la réunion d'étincelles plus petites et jaillissant à des intervalles extrêmement rapprochés. Leur étendue doit exercer une grande influence sur la nature du bruit qui les accompagne. Ce bruit prend, en effet, naissance en tous les points parcourus par l'éclair; et comme il se propage lentement dans l'espace, il doit nous paraître d'autant plus prolongé, que les origines en sont plus inégalement distantes du lieu que nous occupons. A cette cause viennent s'ajouter les réflexions répétées qui s'opèrent à la surface des nuages et à la surface du sol. Aussi, dans les régions montagneuses surtout, le bruit du tonnerre a-t-il quelque chose de formidable. L'action des nuages électrisés se fait vivement sentir à la surface du sol qui se charge d'électricité contraire dans une proportion d'autant plus grande que le nuage est plus fortement électrisé, qu'il est plus rapproché du sol, que le sol est lui-même meilleur conducteur et plus ondulé. Des étincelles jaillissent fréquemment alors entre les nuages et les corps terrestres qui sont dits frappés par la foudre, foudroyés.

Étincelle.

Éclairs.

Tonnerre.

Foudre.

Effets
de la foudre.

448. La foudre suit dans sa marche les routes les plus capricieuses ; cependant, en examinant avec soin les traces de son passage , on reconnaît toujours qu'elle a frappé les objets les plus exposés et les meilleurs conducteurs , qu'elle suit les voies où elle rencontre la somme de résistances la plus faible. Les objets les plus élevés , les arbres , les édifices , les sommets des montagnes , sont les plus exposés à son action ; mais souvent c'est dans la constitution du sol qu'il faut chercher la cause de son choix : un terrain humide , une nappe d'eau souterraine , suffisent pour déterminer l'explosion.

Tous les effets produits par la décharge de nos batteries le sont par la foudre avec une énergie extraordinaire. Les métaux sont fondus , vaporisés , les corps mauvais conducteurs brisés , dispersés. On voit tracés , le long des arbres , des sillons qui vont du sommet jusqu'au sol ; l'écorce est enlevée , lacérée ; les corps combustibles prennent feu. Les individus frappés par la foudre sont sillonnés par l'agent électrique , ou présentent des ecchymoses ramifiées comme les branches d'un arbre. S'ils ne succombent pas immédiatement , ils restent long-temps paralytiques du côté foudroyé , où ils éprouvent de vives douleurs et des contractions involontaires. Au reste , les effets de la foudre sont tellement variés , qu'il nous serait impossible de les énumérer.

Choc en retour.

Il n'est pas nécessaire que l'on soit directement atteint par la foudre pour être foudroyé. Tous les corps sont fortement électrisés sous l'influence d'un nuage orageux , et lorsque ce nuage se décharge par l'un quelconque de ses points , cette électricité , retournant brusquement dans le sol , peut tuer les êtres vivants qu'elle traverse. Il s'est présenté plusieurs exemples de ce *choc en retour*.

Paratonnerre.

449. C'est à Franklin que nous devons l'idée de détourner les effets de la foudre au moyen des paratonnerres , dont

l'utilité ne saurait être contestée. Ces grandes tiges métalliques dont on arme les édifices, et qui, terminées supérieurement par une pointe en platine, viennent inférieurement plonger profondément dans un sol conducteur, versent dans l'atmosphère, pendant les orages, des quantités énormes d'électricité qui va neutraliser celle des nuages. Les paratonnerres n'attirent donc point la foudre; ils la suppriment autour d'eux. Nous savons, en effet, qu'en plaçant une pointe métallique sur le conducteur d'une machine, ou en présentant simplement cette pointe au conducteur, il devient impossible de charger celui-ci.

Mais pour qu'un paratonnerre produise les effets qu'on en attend et ne devienne pas, au contraire, une source de dangers, il est de la dernière importance que la continuité de la tige et sa communication avec le sol soient parfaites : il n'est nullement avantageux, au contraire, qu'il soit isolé des corps conducteurs qu'il doit protéger.

Le nombre et l'importance des orages est très-variable à la surface du globe. Au-delà du cercle polaire, ils sont à peu près inconnus; entre les tropiques, ils se montrent régulièrement tous les soirs pendant la saison des pluies, et le tonnerre y éclate avec un fracas inconnu dans nos contrées.

450. Les orages sont fréquemment accompagnés de grêle, dont la formation semble intimement liée aux phénomènes électriques. On admet généralement, en effet, qu'elle est due à l'action simultanée de deux nuages superposés électrisés inversement, et qui se renverraient réciproquement des flocons de neige. Ceux-ci se recouvriraient successivement de neige et de glace, et acquerraient ainsi un poids suffisant pour surmonter les forces attractives et répulsives des nuages et se précipiter vers le sol. Malgré les efforts de Volta, de Peltier et d'autres physiiciens qui ont cherché

Grêle.

à développer et à perfectionner cette théorie, il reste encore de grandes obscurités sur la formation de la grêle. Taylor mesura, en Angleterre, des grêlons qui avaient 0^m,3 de circonférence; Montigny et Tressan en ramassèrent, à Toul, qui avaient 8 centimètres de diamètre, et on en cite encore de beaucoup plus gros.

Trombes.

451. Les trombes doivent encore être rangées, pour la plupart, dans les phénomènes électriques. Ces épouvantables tourbillons de vent sont produits alors par des nuages fortement électrisés qui, repoussés par la couche de nuages qui leur est supérieure, se rapprochent violemment de la terre et y exercent leurs ravages. Les désastreux effets qu'elles produisent présentent des traces incontestables de la violence du vent, du passage de l'électricité, et des attractions énergiques opérées par le nuage électrisé. Les toits des maisons sont soulevés; les matériaux des édifices, disjoints par cette attraction, s'écroutent sur place; des massifs de maçonnerie sont arrachés de leur base et transportés au loin sans être détruits. Les arbres sont réduits en longues lattes, minces quelquefois comme des allumettes; ils ont fait explosion comme une chaudière sous l'influence de la vaporisation de la sève produite par le passage de l'électricité. La trombe est même quelquefois accompagnée d'éclairs et de flamme qui trahissent son origine électrique.

Les trombes se transportent souvent à des distances assez grandes, mais l'intensité des effets qu'elles produisent n'est nullement en rapport avec leur vitesse de propagation. Contrairement aux ouragans, les trombes sont des phénomènes locaux, ce qu'explique très-bien la cause qui les produit.

CHAPITRE VI.

PHÉNOMÈNES LUMINEUX DE L'ATMOSPHÈRE.

452. La lumière solaire, en traversant l'atmosphère, y donne souvent lieu à des phénomènes d'un trop haut intérêt pour que nous ne leur consacrons pas un dernier chapitre.

L'air atmosphérique est un corps éminemment diaphane, mais aucun ne l'est d'une manière absolue. L'eau la plus limpide prend une couleur glauque particulière quand elle est vue sous une grande épaisseur. L'air est également coloré.

Dans les plus beaux jours, lorsque le ciel est d'un bleu bien pur, il est encore fortement lumineux; la lumière qu'il nous envoie lui vient du soleil, mais elle a été tamisée, décomposée. L'air jouit de la propriété de réfléchir les rayons bleus dans une proportion plus forte que les autres; il jouit en même temps de la propriété inverse de laisser passer plus aisément les rayons jaune-orangé complémentaires du bleu.

Lumière
atmosphérique.

La couleur bleue du ciel s'affaiblit ou disparaît quand l'atmosphère est chargée de particules aqueuses ou solides; elle est alors noyée dans la lumière blanche qui est réfléchie par ces corps étrangers. De même, l'énorme quantité de lumière qui nous arrive du soleil lorsque cet astre est situé dans les régions élevées, masque complètement la couleur jaune orangé que lui imprime l'atmosphère; mais le phénomène reprend tout son éclat à l'aurore ou au coucher du soleil. Tandis que les régions opposées à cet astre sont d'un beau bleu quand elles ne sont pas voilées par les nuages, les régions qui l'avoisinent sont chargées des teintes les plus brillantes, d'un jaune très-chaud, passant, sous l'influence des vapeurs aqueuses, au rouge ou au violet

Diverses
teintes du ciel.

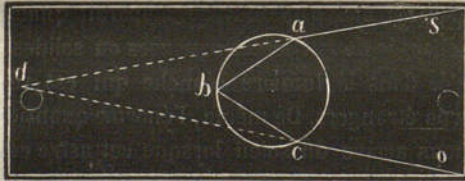
complémentaire du vert. La limite qui sépare ces deux parties du ciel présente une teinte verdâtre qui est due à la superposition de ces deux couleurs.

453. Outre ces phénomènes journaliers de coloration, il s'en produit d'autres qui sont dus à des circonstances accidentelles, et en tête desquels nous placerons l'arc-en-ciel. Quand un nuage se résout en pluie dans la région du ciel opposée à celle qui est occupée par le soleil, et que ce nuage est frappé par les rayons solaires, on voit apparaître un ou deux arcs lumineux teints des couleurs du prisme, et dont le centre est situé sur la ligne qui va du soleil à l'œil de l'observateur. L'arc intérieur est celui dont les couleurs sont les plus vives et les plus pures; le violet s'y montre en dedans, le rouge en dehors. La disposition inverse a lieu dans l'arc extérieur toujours plus pâle.

Arc-en-ciel.

L'arc-en-ciel est produit par la réfraction des rayons solaires dans des gouttes d'eau; aussi peut-on l'apercevoir près des cascades, des jets d'eau, ou derrière les roues d'un bateau à vapeur.

Fig. 280.



Un rayon solaire sa tombe en a sur une goutte d'eau; une partie en est réfléchi, l'autre est ré-

fractée suivant ab . En b , nouvelle division de la lumière; la portion réfléchi se propage suivant bc , et sort en partie suivant la direction co . Les rayons solaires qui couvrent la goutte d'eau émergent ainsi dans les directions les plus diverses, et leur divergence les rend bientôt imperceptibles; mais il existe pour chaque goutte une position de a , telle que les rayons voisins de sa émergent dans

des directions parallèles, et conservent par conséquent leur intensité à toute distance. Ce sont ces rayons *efficaces* qui produisent l'arc-en-ciel. Toutes les gouttes d'eau qui sont situées sur la surface d'un cône dont l'axe passerait par le soleil et l'œil de l'observateur, et dont l'angle au sommet serait égal à l'angle de déviation *s do*, enverront à cet observateur des rayons efficaces ; il apercevra donc un cercle ou simplement un arc lumineux. Mais à chaque rayon inégalement réfrangible correspond une déviation différente. Les arcs colorés formés par les rayons élémentaires du soleil ne se superposent donc pas, et produisent dès lors l'apparence que nous avons cherché à expliquer.

Rayons
efficaces.

L'arc extérieur est dû à une cause analogue ; seulement les rayons efficaces ont éprouvé deux réflexions dans chaque goutte d'eau avant de subir leur seconde réfraction.

454. Les couronnes qui entourent le disque du soleil ou de la lune ont une origine toute différente; elles se rattachent à un ordre de phénomènes connus sous le nom de phénomènes de diffraction, et dans la description desquels nous n'avons pu entrer.

Couronnes.

Les aurores boréales ont une origine inconnue. Ce phénomène extraordinaire qui acquiert dans les régions polaires un éclat et une magnificence incomparables, est à peu près inconnu dans nos climats; du moins n'en voyons-nous que de pâles reflets. Nous n'insisterons donc pas sur leur histoire. Nous dirons seulement qu'elles exercent une action singulière sur l'aiguille aimantée, et que tout nous porte à croire que l'électricité y joue un grand rôle. Peut-être doit-on l'attribuer à l'énorme quantité de cet agent qui est transportée de l'équateur aux pôles par les courants supérieurs, et qui rentre dans le sein de la terre à ces latitudes élevées.

Aurores
boréales.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

LIVRE Ier.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

Numéros.	Pages.
I. Chapitre 1 ^{er} . Propriétés générales de la matière et des corps	9
1. Division des sciences naturelles.....	9
2. Corps organisés et vivants, corps bruts; physiologie, chimie.....	10
4. Physique.....	11
5. Matière; étendue, impénétrabilité, mobilité, inertie..	»
8. Corps; porosité, divisibilité des corps; atomes, molécules.....	12
10. Attraction moléculaire, répulsion due au calorique, compressibilité, élasticité, dilatabilité.....	14
11. Des trois états des corps; état solide, état liquide, état gazeux.....	15
II. Chapitre 2. Corps solides, élasticité des solides.....	17
12. Passage des corps à l'état solide; corps amorphes, cristallisés.....	17
14. Dureté, cohésion, tenacité, résistance à l'écrasement, ductilité, malléabilité.....	19
16. Élasticité, lois de l'élasticité des solides; compressibilité.	20
III. Chapitre 3. Corps liquides, élasticité des liquides... ..	22
19. Propriétés générales des liquides	»
20. Compressibilité des liquides, ses lois; appareil d'Ersted.	»
IV. Chapitre 4. Corps gazeux, élasticité des gaz.....	25
23. Compressibilité des gaz; briquet à air.....	»
24. Lois de l'élasticité des gaz; lois de Mariotte, tube de Mariotte; appareil de MM. Dulong et Arago.....	»
26. Liquéfaction des gaz	28
27. Manomètre.....	29
V. Chapitre 5. Notions générales de statique.....	30
28. Définitions: forces, résultantes, composantes.....	»
30. Composition des forces appliquées en un même point; forces parallèles, forces non parallèles; décomposition des forces.....	30

Numéros.	Pages.
33. Applications ; plan incliné, vis, coin.....	31
36. Composition des forces parallèles appliquées en des points divers d'un même corps : de même sens, de sens contraires.....	33
37. Applications ; leviers des trois genres ; romaine, balance, méthode des doubles pesées ; poulies, moufles, treuils.	34
VI. Chapitre 6. Notions générales et élémentaires de dynamique.....	
42. Définitions ; forces instantanées, continues.....	»
43. Mouvement uniforme rectiligne ; vitesse.....	40
44. Mouvement varié ; composition des vitesses.....	41
46. Mouvement rectiligne, uniformément varié.....	41
47. Mouvement curviligne ; force centripète ; force centrifuge ; mouvement des projectiles.....	»
48. Relations entre la force, le temps de son action, la masse du mobile, la vitesse qu'il acquiert.....	43

LIVRE II.

PESANTEUR.

VII. Chapitre 1 ^{er} . Effets généraux de la pesanteur.....	
49. Tous les corps pèsent ; pesanteur de l'air.....	»
51. La pesanteur agit de la même manière sur tous les corps ; chute des corps dans le vide.....	46
51. Poids des corps proportionnel à leur masse ; poids spécifique, densité, mesure des poids, gramme ; poids relatif, poids absolu.....	47
51. Attraction universelle, ses lois.....	48
51. Pesanteur, ses lois ; lois de la chute des corps, loi des vitesses, loi des espaces.....	»
54. Vérification expérimentale des lois de la pesanteur ; machine d'Atwood.....	50
VIII. Chapitre 2. Pendule.....	
55. Direction de la pesanteur, verticale ; fil à plomb.....	»
56. Pendule ; lois du pendule.....	52
59. Application du pendule aux horloges ; balancier, mouvement des montres.....	53
61. Mesure de la pesanteur ; variation de la pesanteur à la surface du globe.....	56
IX. Chap. 3. Equilibre des corps pesants solides et fluides.	
63. Équilibre des solides. Centre de gravité ; conditions d'équilibre des corps solides, suspendus par un de leurs points, reposant sur un obstacle.....	»
64. Station ; marche.....	59
65. Équilibre des fluides. Principe de l'équilibre moléculaire ; principe de l'égalité de transmission des pressions...	»

Numéros.	Pages.
67. Conditions d'équilibre des surfaces continues.....	60
68. Conditions d'équilibre des surfaces discontinues; vases communiquants, niveau d'eau.....	61
69. Niveau des mers; aplatissement de la terre; marées.....	62
X. Chapitre 4. Pressions dans les liquides.....	64
72. Pressions sur le fond des vases; appareil de Haldat.....	”
74. Pressions dans la masse fluide; pressions latérales; tour- niquet hydraulique; paradoxe hydrostatique.....	66
77. Équilibre des liquides hétérogènes dans les vases commu- niquants.....	68
78. Presse hydraulique.....	69
XI. Chapitre 5. Equilibre des gaz.....	71
79. Pression atmosphérique; crève-vessie, hémisphères de Magdebourg.....	”
81. Mesure de la pression atmosphérique; baromètres à cu- vette, à siphon, à cadran.....	72
85. Variations du baromètre avec les hauteurs; mesure des hauteurs par le baromètre; baromètre de Gay-Lussac, baromètre de Fortin.....	75
XII. Chapitre 6. Equilibre des corps plongés dans les fluides; mesure des densités.....	77
87. Poussée des fluides; principe d'Archimède; ludion. Dé- monstration expérimentale du principe d'Archimède..	”
91. Baroscope; ballons.....	79
93. Mesure des volumes des solides, des vases et des liquides..	80
94. Mesure des poids spécifiques; densités des solides, des liquides.....	81
96. Aréomètres; à poids constant, à volume constant.....	82
97. Balance hydrostatique de Mohr.....	84
XIII. Chapitre 7. Pompes.....	86
98. Pompe à gaz de Gay-Lussac; espace nuisible, pression sur le piston.....	”
100. Machine pneumatique; machine à compression.....	88
102. Pompe aspirante, pression sur le piston; pompe aspirante et foulante, pompe foulante, pompe des prêtres.....	90
XIV. Chapitre 8. Mouvements des corps solides et fluides.	93
106. Mouvements des solides.....	”
107. Ecoulement des liquides, théorème de Toricelli; jets d'eau; contraction de la veine fluide, ajutages.....	94
108. Mouvement vibratoire des veines fluides.....	96
109. Fontaine de compression; fontaine de Héron; vase de Mariotte; fontaine intermittente; siphon; siphon inter- mittent; fontaines intermittentes naturelles; quinquets, lampes.....	97

Numéros.	Pages.
112. Ecoulement des gaz; mouvement vibratoire des veines gazeuses.....	100
113. Vitesses du vent; tirage des cheminées; gazomètres.....	101
XV. Chapitre 9. Phénomènes moléculaires.....	
116. Forces moléculaires, variations dans leur intensité avec les distances; adhésion des corps.....	104
118. Inflexion des surfaces liquides près des parois des vases; phénomènes capillaires; influence de la surface terminale des liquides sur les phénomènes capillaires; attraction et répulsion des corps légers.....	105
123. Imbibition; endosmose, lois de l'endosmose; endosmose gazeuse.....	107

LIVRE III.

CHALEUR.

XVI. Chapitre 1 ^{er} . Effets généraux de la chaleur; thermomètre.....	111
127. Effets généraux de la chaleur.....	"
128. Thermomètre à mercure, sa construction, sa graduation; glace fondante, eau bouillante.....	112
129. Température; échelles Réaumur, centigrade.....	114
131. Thermomètre à alcool.....	115
XVII. Chapitre 2. Dilatation des solides.....	
133. Coefficients de dilatation; cubique, linéaire.....	"
134. Mesure de la dilatation linéaire; appareil de Lavoisier.....	"
136. Variations du coefficient de dilatation des corps.....	119
137. Applications de la dilatation des solides; pendule compensateur; thermomètre de Breguet; pyromètre de Sévres; couleur des corps chauds.....	"
XVIII. Chapitre 3. Dilatation des liquides.....	
140. Dilatation des enveloppes; dilatation apparente, absolue.....	"
141. Mesure de la dilatation absolue du mercure; appareil de M. Regnault.....	"
143. Dilatation des autres liquides; jaugeage du réservoir; mesure de la dilatation apparente du liquide, de la dilatation absolue des enveloppes, de la dilatation absolue des liquides.....	125
144. Maximum de densité de l'eau.....	126
145. Corrections des hauteurs barométriques, des densités.....	127
XIX. Chapitre 4. Dilatation des gaz.....	
146. Mesure de la dilatation des gaz; procédé de M. Regnault; résultats.....	"

Numéros.	Pages.
149. Lois de Gay-Lussac.....	132
150. Thermoscope de Rumford; thermomètre différentiel de Leslie; thermomètre à air.....	133
XX. Chapitre 5. Mesure des capacités des corps pour la chaleur.....	
151. Capacité des corps pour la chaleur; influence de la masse de la température sur la chaleur absorbée; unité de chaleur.....	134
154. Appareil et expériences de M. Regnault; capacité des atomes; calorimètre de Lavoisier et Laplace.....	136
157. Capacité calorifique des gaz, ses variations.....	139
XXI. Chapitre 6. Fusion et solidification des corps.....	
158. Fusion des corps; constance de la température de fusion.....	140
160. Chaleur latente de fusion; chaleur latente de la glace....	141
161. Congélation des liquides; dégagement de leur chaleur latente.....	142
162. Mesure des chaleurs latentes.....	143
163. Mélanges réfrigérants.....	143
164. Force expansive de la glace; action physiologique du froid.....	144
XXII. Chapitre 7. Formation et condensation des vapeurs.....	
166. Evaporation; point de volatilisation, point de condensation.....	144
168. Vapeurs dans le vide; maximum de tension des vapeurs; vapeurs dilatées.....	146
169. Analogie des gaz et des vapeurs; mélange des gaz, mélange des gaz et des vapeurs.....	147
172. Densité des gaz; densité des vapeurs; procédé de Gay-Lussac, procédé de Dumas.....	149
XXIII. Chapitre 8. Mesure des tensions des vapeurs.....	
174. Variation du maximum de tension des vapeurs avec la température; tension de la vapeur d'un liquide en ébullition.....	151
176. Mesure des tensions maxima des vapeurs; appareil de M. Regnault pour les basses températures.....	152
178. Tension des vapeurs dans l'air et les gaz.....	154
179. Tension de la vapeur dans un espace inégalement chaud; condensateur de Watt.....	154
180. Mesure des tensions par M. Regnault pour les hautes températures, tables.....	155
181. Loi de Dalton.....	157
XXIV. Chapitre 9. Ebullition; chaleur latente de volatilisation.....	
182. Ebullition; température d'ébullition, influence de la pression sur cette température; marmite de Papin, autoclave.....	158

Numéros.	Pages.
184. Chaleur latente de volatilisation, mesure de cette chaleur latente; chauffage à la vapeur.....	161
XXV. Chapitre 10. Machines à vapeur.....	
186. Machines à vapeur.....	" "
188. Chaudière; boîte à fumée, boîte à feu, chambre à vapeur; surface de chauffe.....	" "
189. Distribution de la chaleur; tiroir, bielle, points morts; excentrique.....	166
191. Résistance des convois.....	168

LIVRE IV.

MAGNÉTISME.

XXVI. Chapitre 1 ^{er} . Aimants et substances magnétiques. 171	
192. Aimants naturels; substances magnétiques.....	" "
195. Pôles des aimants; aimantation par influence; force coercitive.....	172
196. Aimants artificiels; pôles des aimants artificiels; action réciproque des aimants.....	173
197. Direction des aimants par la terre; pôles magnétiques terrestres; pôle boréal, pôle austral.....	174
198. Ligne neutre; pôles nouveaux d'un aimant brisé.....	175
XXVII. Chapitre 2. Action de la terre sur les aimants... 176	
199. Déclinaison de l'aiguille aimantée; variations de la déclinaison; variations séculaires, diurnes, accidentelles; variations à la surface du globe.....	" "
201. Boussole marine; compensateur magnétique.....	177
203. Boussole d'inclinaison.....	179
204. Couple terrestre; loi de la force directrice terrestre; aimantation par la terre.....	" "
XXVIII. Chapitre 3. Lois des actions magnétiques..... 181	
206. Loi des actions magnétiques; balance magnétique de Coulomb.....	" "
208. Vérification de la loi des forces directrices, de la loi des répulsions, de la loi des attractions magnétiques.....	182
210. Mesure des forces magnétiques terrestres.....	183
212. Distribution du magnétisme sur les barreaux aimantés... 184	
XXIX. Chapitre 4. Procédés d'aimantation..... 185	
213. Méthodes de la simple touche, de la touche séparée.....	" "
215. Affaiblissement des aimants; armures des aimants.....	186

LIVRE V.

ÉLECTRICITÉ.

Numéros.	Pages.
XXX. Chapitre 1^{er}. Attractions et répulsions électriques. 188	
216. Electrification par frottement	»
217. Attractions, répulsions électriques ; dualité et antagonisme des forces électriques	»
221. Corps bons, corps mauvais conducteurs	191
221 bis. Loi de l'électrification par frottement ; existence hypothétique des deux électricités	»
XXXI. Chapitre 2. Lois des attractions et répulsions électriques. 193	
223. Electrification par influence	»
224. Distribution de l'électricité à la surface des corps ; tension de l'électricité	»
225. Attractions et répulsions des corps électrisés ; lois de ces actions ; balance électrique	195
228. Lois de la distribution de l'électricité à la surface des corps ; pouvoir des points	197
229. Machines électriques	»
XXXII. Chapitre 3. Condensateurs 199	
230. Influence mutuelle des corps électrisés sur la distribution des électricités à leur surface	»
231. Condensateur ; distribution de l'électricité à sa surface, électricité dissimulée ; condensateur à lame de verre ; influence de la lame de verre sur le pouvoir d'un condensateur	200
234. Bouteille de Leyde ; batteries électriques ; charge et décharge des bouteilles et batteries	202
236. Electroscope condensateur ; électrophore	204
XXXIII. Chapitre 4. Étincelle ; ses propriétés 205	
239. Effets physiologiques ; commotions	»
241. Effets chimiques ; combinaisons, décompositions produites par l'étincelle	206
242. Effets calorifiques et mécaniques	208
245. Effets lumineux ; étincelle dans le vide, dans l'air et les gaz ; durée de l'étincelle	209
249. Ecoulement de l'électricité par les pointes ; figures de Lichtenberg	211
XXXIV. Chapitre 5. Sources d'électricité 212	
250. Frottement, pression, percussion, rupture, clifrage, contact	»
252. Chaleur	213

Numéros.	Pages.
253. Actions chimiques; évaporation.....	213
255. Actions vitales.....	215
XXXV. Chapitre 6. De la pile voltaïque.....	
256. Découverte de Galvani; électricité animale..	»
258. Théorie de Volta ou du contact; force électro-motrice; pile de Volta, pôles de la pile, courant voltaïque..	217
262. Théorie électro-chimique de la pile	220
XXXVI Chapitre 7. Effets de la pile.....	
264. Effets physiologiques; commotion..	»
265. Effets chimiques; décomposition de l'eau et des sels.....	222
268. Effets calorifiques et lumineux	224
271. Charge du condensateur par la pile.....	226
XXXVII. Chapitre 8. Electro-magnétisme	
272. Direction de l'aiguille aimantée par les courants; dévia- tion du pôle austral à gauche du courant.....	»
274. Attraction, répulsion, rotation des aimants par les courants.	228
275. Galvanomètres	229
276. Aimantation par les courants.....	230
XXXVIII. Chapitre 9. Applications de l'électro-magné- tisme.....	
278. Electro-aimants	»
279. Machines électro-magnétiques.....	233
281. Télégraphes électriques.....	236
XXXIX. Chapitre 10. Production et direction des courants par les aimants.....	
283. Courants induits par les aimants.....	»
284. Propriétés des courants induits; machine de Clarcke...	240
286. Effets physiologiques, chimiques, physiques des courants.	241
290. Direction, attraction, répulsion des courants par les aimants.....	242
291. Direction des courants par la terre.....	244
292. Magnétisme en mouvement.....	»
XL. Chapitre 11. Electro-dynamique.....	
293. Courants induits par les courants et par eux-mêmes.....	»
295. Attraction, répulsion et direction des courants par les courants	246
296. Lois des actions des courants sur les courants.....	»
297. Solénoïdes... ..	247
298. Théorie électrique du magnétisme; courant terrestre....	248
XLI. Chapitre 12. Mesure des courants.....	
300. Mesure par les actions chimiques.....	250
301. Mesure par les actions magnétiques; boussole des sinus, sa graduation.....	251
303. Mesure par les actions thermiques.....	253

Numéros.	Pages.
XLII. Chapitre 13. Des lois de la pile.....	254
304. Résistance des conducteurs; leur influence sur l'intensité du courant.....	»
306. Lois des résistances des conducteurs.....	256
307. Loi de Ohm; limite de son degré d'exactitude.....	257
308. Force électromotrice; intensité; influence du nombre et de la grandeur des couples.....	258
XLIII. Chapitre 14. Des diverses piles électriques.....	260
310. Piles à un seul liquide; piles de Volta, de Wollaston, de Munch, de Smée, de Sturgeon.....	»
316. Piles à deux liquides; piles de Daniel, de Bunzen.....	264
XLIV. Chapitre 15. Applications des propriétés chimiques des courants voltaïques.....	265
318. Loi des décompositions chimiques par la pile.....	»
319. Galvano-plastique.....	267
321. Dorure, argenture, etc.....	269
324. Colorations par l'oxyde de plomb.....	271
XLV. Chapitre 16. Thermo-électricité.....	272
325. Chaleur et froid produits par le passage des courants au travers des conducteurs.....	»
326. Courants thermo-électriques; leurs lois.....	273
328. Thermomètres thermo-électriques; pile de Melloni.....	274
329. Nature des forces électriques.....	276

LIVRE VI.

ACOUSTIQUE.

XLVI. Chapitre 1 ^{er} . Des bruits et sons.....	277
331. Bruits, sons, leurs caractères; roues dentées; syrène.....	»
333. Principales causes de production des bruits.....	279
334. Principales causes de production des sons.....	»
XLVII. Chapitre 2. Classification des sons.....	281
337. Qualités des sons, timbre, intensité, hauteur.....	»
338. Nombres de vibrations correspondant aux divers sons.....	282
339. Sons à l'octave; gamme; intervalle des sons de la gamme.....	283
340. Constance des intervalles des sons de la gamme; mesure des sons.....	284
342. Inégalité des intervalles musicaux; transposition, dièses, bémols, tempéraments.....	285
XLVIII. Chapitre 3. Propagation des sons dans l'espace.....	287
344. Le son se propage dans les milieux pondérables, mais non dans le vide.....	»
345. Vitesse du son dans l'air et les autres milieux pondérables.....	288
347. Variation de l'intensité du son avec la distance.....	289

Numéros.	Pages.
349. Ondes aqueuses; ondes sonores; longueur d'onde . . .	290
350. Réflexion des ondes; échos; porte-voix	292
XLIX. Chapitre 4. Vibration de l'air dans un espace limité.	
	293
352. Vibration de l'air dans les tuyaux; nœuds, ventres . . .	»
353. Renforcement des sons par les tuyaux; instruments à embouchure de flûte	294
355. Sons harmoniques des tuyaux; tuyaux ouverts, tuyaux fermés.	295
356. Vibrations des masses d'air; renforcement des sons par les caisses des instruments de musique	296
L. Chapitre 5. Vibrations des corps solides.	
	297
357. Vibrations longitudinales	»
357. Vibrations transversales des plaques	298
358. Vibrations des cordes; leurs lois; leurs applications . . .	»
360. Tables d'harmonie; leurs vibrations; âme des violons . . .	299
361. Sons harmoniques des cordes	300
362. Vibrations des lames; instruments à anche libre, battante.	361
364. Vibrations des lèvres dans les instruments en cuivre; voix	302

LIVRE VII.

OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE.

LI. Chapitre 1 ^{er} . Mode général de propagation de la lumière	
	303
366. Vibrations lumineuses; leur transmission au travers du vide	»
368. Corps lumineux	304
369. La lumière se propage en ligne droite; ondes lumineuses; ombre, pénombre	305
371. Image des corps lumineux	307
372. Vitesse de propagation de la lumière	308
LII. Chapitre 2. Réflexion de la lumière	
	309
373. Réflexion diffuse et régulière	»
375. Lois de la réflexion régulière	310
376. Miroirs plans; images formées par les miroirs plans; réflexions multiples; kaléidoscope	311
377. Miroirs concaves; foyers conjugués, foyer principal . . .	313
378. Images produites par les miroirs concaves; images réelles, images virtuelles.	314
379. Miroirs convexes; images virtuelles	315
LIII. Chapitre 3. Phénomènes généraux de réfraction de la lumière	
	316
380. Réfraction des rayons lumineux	»
382. Lois de la réfraction de la lumière; ses effets.	318
384. Réflexion totale; réfractions astronomiques; mirage . . .	319

Numéros.	Pages.
LIV. Chapitre 4. Des prismes et lentilles 322	
386. Prisme; déviation des rayons par le prisme; déviation minimum	322
388. Indice de réfraction; sa mesure	323
389. Lentilles convergentes; foyer principal, foyers conjugués	324
392. Images réelles, virtuelles	326
393. Lentilles divergentes, images virtuelles	327
LV. Chapitre 5. Vision 328	
394. Chambre noire; œil	»
395. Réfractions opérées dans l'œil	330
397. Qualités de la vision; délicatesse, sensibilité, netteté, accommodement aux distances; myopie, presbytie	332
LVI. Chapitre 6. Instruments d'optique 335	
399. Loupe; microscope simple, microscope solaire, lanterne magique	»
401. Microscope composé; lunettes astronomique, terrestre, de Galilée ou des spectacles; télescopes	337
403. Estimation des grandeurs et des distances; erreurs dans la vision	340

LIVRE VIII.

DES RAYONNEMENTS COLORIFIQUES, CHIMIQUES,
PHOSPHORESCENTS, CALORIFIQUES.

LVII. Chapitre 1 ^{er} . Rayonnements colorifiques 342	
404. Décomposition de la lumière par le prisme; spectre lumineux; homogénéité des couleurs du spectre	»
405. Recomposition de la lumière blanche; coloration des corps	343
407. Acromatisme des prismes, des lentilles	345
408. Chromasie de l'œil; sensibilité de l'œil pour les couleurs; échelle chromatique	346
LVIII. Chapitre 2. Rayonnements chimiques et phosphorescents 348	
411. Propriétés chimiques du rayonnement solaire; rayons chimiques	»
412. Photographie sur plaqué, sur papier	349
414 Propriétés phosphogéniques de la lumière	352
LIX. Chapitre 3. Rayonnements calorifiques 353	
415. Chaleur solaire; spectre calorifique; diathermanéité; thermochroïsme	»
416. Chaleur rayonnante terrestre; expériences de Leslie, de Melloni	354
418. Propriétés des rayons calorifiques; influence de l'atmosphère sur la température du sol	357

Numéros.	Pages.
LX. Chapitre 4. Rayonnement particulaire; conductibilité des corps pour la chaleur	358
420. Pouvoir émissif, absorbant; équilibre mobile de température	358
422. Transmission de la chaleur par contact, par voie de conductibilité; conductibilité des solides; appareil d'Ingenhouz	359
423. Effets dus à la conductibilité des corps solides	360
424. Conductibilité des liquides, des gaz	361
426. Rayonnement particulaire	362

LIVRE IX.

NOTIONS DE MÉTÉOROLOGIE.

LXI. Chapitre 1 ^{er} . Chaleur terrestre	363
427. Chaleur propre du globe; cause des révolutions du globe; variations de la température avec la profondeur	»
430. Température de l'air; variations diurnes, annuelles; lignes isothermes ou d'égale température moyenne	365
432. Climats; climats marins; climats excessifs ou continentaux	368
433. Variation de la température avec la hauteur	»
LXII. Chapitre 2. Des vents	369
434. Cause générale des vents; alisés, moussons, brises; vents dans les régions tempérées; qualités des vents	»
436. Courants marins; influence des courants atmosphériques et marins sur la température des divers points du globe	372
LXIII. Chapitre 3. Des météores aqueux	373
437. Humidité de l'air; état hygrométrique; psychromètre, hygromètre à cheveu; variations du degré hygrométrique de l'air	»
439. Condensation de la vapeur d'eau; rosée, gelée blanche, serein, brouillards, nuages, pluie, neige	376
441. Distribution des pluies à la surface du globe	379
LXIV. Chapitre 4. Variations barométriques	380
442. Variations diurnes, annuelles, accidentelles	»
443. Influence des vents sur le baromètre; prédictions barométriques	381
LXV. Chapitre 5. Phénomènes électriques de l'atmosphère	383
444. Electricité atmosphérique; électricité des nuages	»
447. Etincelle; tonnerre; foudre, ses effets	385
449. Paratonnerres	386
450. Grêle; trombes	387
LXVI. Chapitre 6. Phénomènes lumineux de l'atmosphère	389
452. Lumière atmosphérique	»
453. Arc-en-ciel; couronne; aurores boréales	390





490. Pouvoir dissipatif des solides ; équilibre mobile de température	300
491. Transmission de la chaleur par contact, par rayonnement ; conductibilités des solides ; effets d'isolation	301
492. Échelle des conductibilités des corps solides	302
493. Échelle des conductibilités des gaz	303
494. Rayonnement particulaire	304

LIVRE IX.

PHÉNOMÈNES DE MÉTÉOROLOGIE.

LXXI. Chapitre 1. Chaleur terrestre.		305
495. Étendue superficielle de la terre ; zones des latitudes du soleil ; variations diurnes et saisonnières de la chaleur	305	
496. Température moyenne ; variations diurnes et saisonnières ; effets de l'altitude ; effets de la latitude ; effets de la nature du sol ; effets de la direction des vents ; effets de la proximité de la mer	306	
LXXII. Chapitre 2. Des vents.		308
497. Causes générales des vents ; vents ; moussons ; brises ; vents locaux ; vents tempérés ; qualités des vents	308	
498. Mouvements marins ; influence des courants atmosphériques et marins sur la température des divers points du globe	310	
LXXIII. Chapitre 3. Des neiges et glaces.		312
499. Neige ; glace ; glace éternelle ; glaciers ; icebergs ; effets de la glace sur le climat ; effets de la glace sur la navigation	312	
500. Distribution des neiges à la surface du globe	313	
LXXIV. Chapitre 4. Variations barométriques.		315
501. Variations diurnes ; variations saisonnières ; variations locales	315	
502. Influence des vents sur le baromètre ; variations barométriques	316	
LXXV. Chapitre 5. Phénomènes électriques de l'atmosphère.		318
503. Électricité atmosphérique ; électricité des nuages	318	
504. Éclairs ; tonnerre ; foudre ; ses effets	319	
505. Éclaircies	320	
506. Orages ; trombes	321	
LXXVI. Chapitre 6. Phénomènes lumineux de l'atmosphère.		323
507. Lueur atmosphérique	323	
508. Arc-en-ciel ; couronnes ; arcs-en-ciel	324	



