

Institut Agronomique
16, Rue Claude-Bernard.

Cours de Physique
professé

par M^r Brillouin.

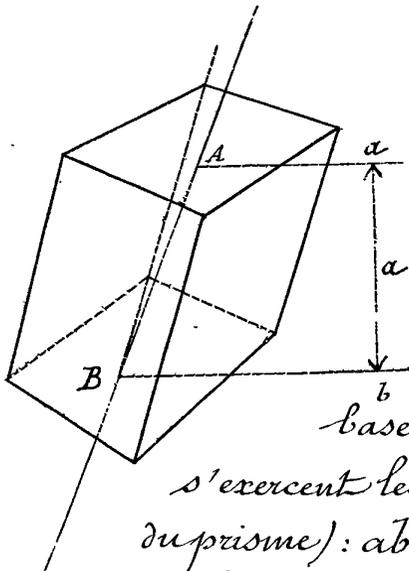
Année 1891-1892.

Cours de Physique.

Rappel des Propriétés des Corps pesants.

Fluide: un corps qu'on peut déformer sans aucun effort pourvu qu'on laisse son volume invariable - cette définition entraîne comme conséquence la propriété fondamentale, employée par Stevin et par Pascal: la pression par unité de surface sur un petit disque plan touché par le fluide sur une de ses faces seulement, est perpendiculaire à cette face, et indépendante de l'orientation de l'élément plan.

Différence de pression entre deux points situés à différents niveaux:



Soient f_A la pression normale qui s'exerce sur la face supérieure d'un prisme orienté d'une façon quelconque pris au sein du fluide considéré (homogène ou non): f_B la force qui s'exerce sur la face inférieure. Soient P le poids de ce prisme; AB la distance des deux bases comp suivant la direction où s'exercent les pressions (normales aux deux bases du prisme): ab la distance verticale des centres de ces deux bases; la différence des premiers entre les deux points A et B est donnée par la formule:

$$f_A - f_B = \rho \frac{ab}{AB} = 0$$

Ce théorème se démontre en écrivant que, puisque le prisme est en équilibre, la somme des projections sur l'axe AB de toutes les forces qui le sollicitent, est nulle.

De ce théorème on conclut immédiatement :

1° Que dans un liquide pesant en équilibre les surfaces de niveau sont horizontales.

2° Que la surface libre d'un liquide en équilibre est une surface de niveau quelle que soit la forme du vase.

3° Que si dans un tube en U on a plusieurs liquides de poids spécifiques p , p' , de hauteur h , h' au-dessus de la surface libre de séparation la condition d'équilibre est :

$$ph = p'h'$$

Principe d'Archimède.

Resumé des propriétés mécaniques des Corps Solides, Liquides ou Gazeux.

Comment se comportent ces divers corps quand on fait varier la pression et la température à laquelle ils sont soumis.

I. Gaz.

Gaz enfermé dans un cylindre muni d'un piston chargé de poids. 

t. - Température du gaz en degrés centigrades.

p. - Pression exprimée en kilogrammes par mètre carré.

[1 atmosphère, ou 760 millimètres de mercure à 0°, donnent une pression de 10333 kilogrammes par mètre carré] cette pression est obtenue en divisant le poids du piston et de sa charge (en kilogrammes) par la surface du piston (section droite du cylindre) exprimée en mètres carrés.

V. Volume occupé par le gaz sous le piston en

mètres cubes.

d. - Densité du gaz par rapport à l'air
0,001293 poids spécifique de l'air sec à 0°, et 1 atmosphère.

La formule ordinaire du poids d'un gaz qui résume les lois de Mariotte et de gaz Lussac, donne pour le poids P exprimé en kilogrammes du gaz contenu dans le cylindre.

$$P = v \cdot 1,293 \cdot d \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{t}{273}}$$

le coefficient de dilatation $0,00366 = \frac{1}{273}$.

Écrite autrement, résolue par rapport à p.v. cette formule est

$$p \cdot v = P \times \frac{10333}{273 \times 1,293 \cdot d} (273 + t)$$

Lorsque le poids P du gaz est 1 kilogramme la formule est

$$p \cdot v = R (273 + t) \text{ en posant } R = \frac{10333}{273 \times 1,293 \cdot d}$$

_____ Valeurs de R pour différents gaz. _____

Air	29,27	Acide carbonique	19,14
Oxygène	26,47	Protoxyde d'azote	19,25
Hydrogène	423,	Vapeur d'eau	45

seulement aux basses températures.

On rapporte souvent en thermochimie, les propriétés du corps, non pas à 1 kilogramme, mais à un nombre de grammes mesuré par le poids atomique, ou par le poids moléculaire. -

Pour les gaz, une quantité qui correspond au poids moléculaire exprimé en grammes, occupe à 0°, et 1 atmosphère, le même volume 22^{lit.} 32 ou 0,02232 mètre cube. Si on prend pour P, ce poids qui n'est autre que la densité d. (Loi des combinaisons en volume, Gay-Lussac).

Oxygène	4x8 = 32	Protoxyde d'azote	2x22 = 44
Hydrogène	2x1 = 2	Vapeur d'eau	2x9 = 18
Acide carbonique	2x22 = 44	Chlore	2x35,5 = 70

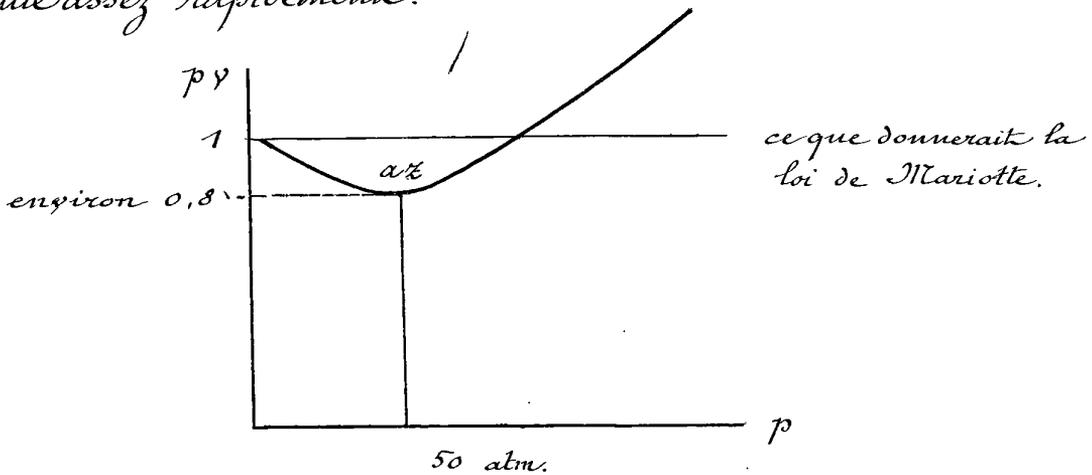
On a: $R' = P \text{ mol.} \times R = d \cdot R \times$

$R' = 0,842.$

$p \cdot v. = 0,842 (274 + t)$

pour ce qu'on appelle en Chimie, 4 volumes, d'un gaz quelconque difficilement liquéfiable.

Les lois de Mariotte et Gay-Lussac, suffisantes dans un grand nombre d'applications, ne sont pas rigoureuses. A température constante le produit de la pression par le volume d'une même masse de gaz diminue très lentement quand la pression augmente beaucoup. - [Sauf pour l'hydrogène] - ce produit passe par un minimum, pour une certaine pression, et croît en suite assez rapidement.



(Cailletet - Amagat).

— Ordre de grandeur des écarts. —

Expériences de Regnault.

Pour réduire de 1 à 0,05 ou $\frac{1}{20}$ le volume des gaz suivants, il faut employer au lieu de 20 fois la pression initiale (Loi de Mariotte) les pressions suivantes :

Air	19,72	Acide carbonique . . .	16,70
Azote	19,79	Hydrogène	20,17

Ce sont des écarts certains, mais encore faibles pour 20 atmosphères. Pour des variations de pression de quelques atmosphères

(3 ou 4, au moins) on peut appliquer la loi de Mariotte en toute confiance.

Le minimum du produit p.v. correspond aux pressions de
50 atmosphères pour l'azote.

50 _____ l'oxyde de carbone.

65 _____ air et l'Éthylène.

100 _____ oxygène.

120 _____ Formène.

il est extrêmement accentué pour les derniers gaz Formène et surtout Éthylène.

II. Liquéfaction des gaz

Vapeurs saturantes. Point critique.

Quand un récipient bien privé d'air contient un liquide et de la vapeur de ce liquide, la pression exercée par la vapeur a une valeur indépendante du volume qui lui est offert, tant que le liquide n'est pas entièrement vaporisé.

Expérience avec le baromètre humide sur la cuvette profonde.

Chaque centimètre cube contient toujours la même quantité de vapeur, et l'augmentation du volume offert à la vapeur a pour effet la vaporisation d'une partie du liquide.

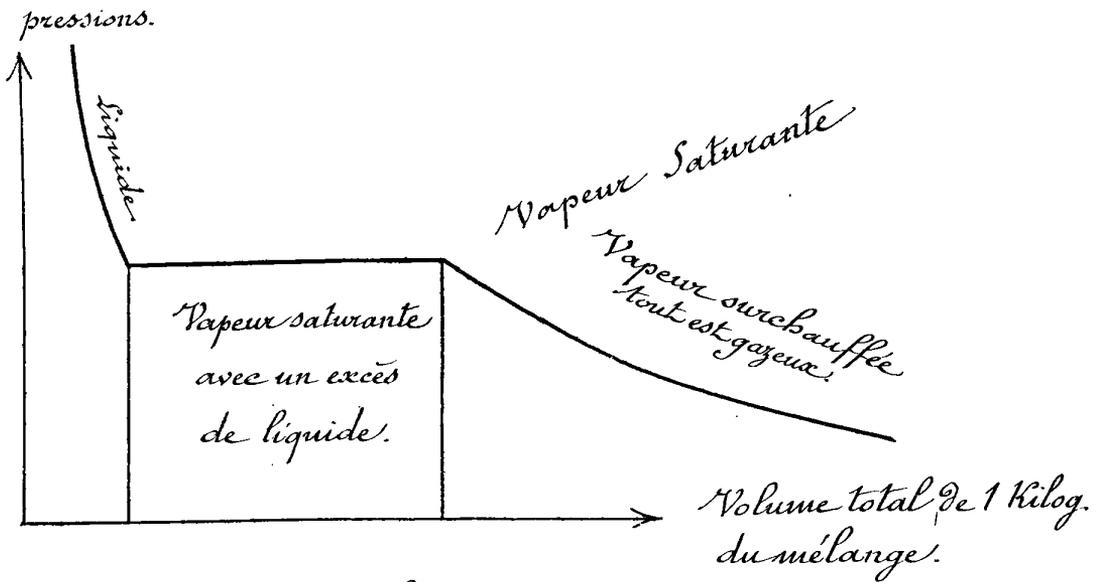
Saturation.

Quand tout le liquide est vaporisé, la vapeur se répartit uniformément dans tout le volume, ne peut plus rester en quantité constante dans chaque centimètre cube, la pression diminue à mesure que le volume augmente, à peu près comme pour un gaz.

- Vapeur non saturante et surchauffée.

Lorsqu'on diminue le volume, en enfonçant le tube, la vapeur se condense sans changement de pression, la quantité de liquide

augmente; enfin le volume devient assez petit pour que toute la vapeur soit condensée, en qu'il ne reste plus que du liquide. - À partir de ce moment, il devient très difficile de réduire le volume, il faut employer de très fortes pressions à cause de la faible compressibilité du liquide.



La pression de la vapeur saturante, ou tension maximum dépend de la nature du liquide, et pour un même liquide de la température. - Cette pression croît extrêmement vite avec la température:

	Vapeur d'eau:	
0°	4 ^{mm} 6	} en millimètres de mercure
50°	92 ^{mm}	
100	760 ^{mm}	
150	3581 ^{mm}	
200	11689 ^{mm}	

Pour un kilogramme de matière en partie à l'état liquide en partie à l'état de vapeur saturante, la pression ne dépend donc que de la température et sera fournie par les tables résumant les expériences de Regnault. (Agendas et Aides-Mémoires

industriels, chimiques, physiques, électriques, etc.)

De quoi dépend le volume occupé par le mélange?
de la température et de la proportion de liquide et de vapeur.

V_t . le nombre de mètres cubes occupés par un kilogramme de vapeur saturante à la température t .

v_t le nombre de mètres cubes occupés par un kilogramme de liquide à la même température.

p . le nombre de kilogrammes de liquide.

$1-p$ ————— de la vapeur.

le volume total est :

$$p v_t + (1-p) V_t.$$

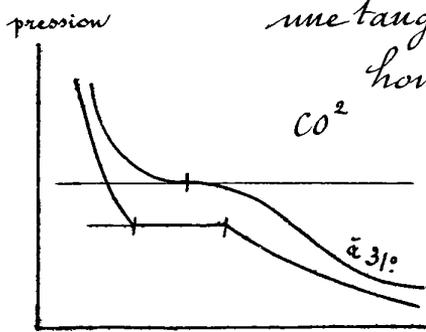
Le volume V_t de la vapeur est beaucoup plus grand que v_t , pour les corps ordinairement liquides. - On n'en obtient souvent qu'une valeur très grossière en cherchant à le calculer par les lois de Mariotte et Gay-Lussac au moyen de la pression et de la température de saturation, et de la densité théorique (chimique, déduite du poids moléculaire du corps) ou de la densité observée sur la vapeur très surchauffée. - Il faut mesurer ce volume V_t directement par des expériences spéciales.

Le volume de la vapeur saturante peut ne pas différer beaucoup du volume du liquide à la même température; c'est ce qui arrive pour l'acide carbonique, dont l'étude détaillée a été faite en 1870 par Andrews. Quand on comprime de l'acide carbonique à une température inférieure à 31° , on observe d'abord la diminution de volume avec accroissement de pression, puis la séparation en deux couches, - diminution de volume, augmentation de la couche inférieure, pression invariable, - puis quand la couche inférieure a tout envahi, de nouveau augmentation de pression avec

diminution assez lente du volume. Fig. (Diagramme p. 9.).

Le volume V au moment où la couche liquide commence à paraître et le volume V' , au moment où la vapeur vient d'être entièrement condensée diffèrent d'autant moins que la température de l'expérience diffère moins de 31° . — A 25° , à 28° , l'acide carbonique liquide peut être converti entièrement en vapeur dans un volume égal à une fois et demie ou une fois et quart celui du liquide. (Expérience, avec le tube de Matherer).

A 31° , les volumes sont égaux, on n'observe plus de palier, dans la courbe de compression, mais seulement une tangente horizontale et la matière reste homogène quelle que soit la pression, elle ne se sépare plus en deux couches.



A 32° , à 35° et au dessus, la loi de compression se rapproche de la loi de Mariotte, les deux courbures de la ligne de 31° s'atténuent, et toute diminution de volume est accompagnée d'une augmentation de pression — aucune séparation en deux couches, liquide et gaz ne se produit plus.

Au-dessous de 31° seulement la liquéfaction peut être observée. Cette température est appelée température ou point critique et la pression correspondant à la tangente horizontale, pression critique.

De là la nécessité pour liquéfier les gaz dits permanents d'abaisser d'abord beaucoup leur température.

Essais infructueux de Matherer par compression à

2000 atmosphères.

Succès de M^r Cailletet, en refroidissant le gaz comprimé à 300 atmosphères par sa brusque détente (Expérience inverse de celle d'échauffement par compression, briquet à air).

Succès de M^r Pictet, de M^r Wróblewski, etc. par évaporation rapide de divers gaz SO², chlorure de méthyle CO² et éther, formène, éthylène, etc.

	Temp. Crit.	Pression crit. en atmosphères.
Oxygène	-118°	. 50
Oxyde de carbone	141°	. 35
Azote	145°	. 33,6
Formène	82°	. 55

(évaluées en admettant la loi de Gay-Lussac pour l'hydrogène).

— Propriétés des liquides. —

Compressibilité cubique. - Sous l'action d'une augmentation de pression, le volume d'un liquide diminue, et on appelle coefficient de compressibilité cubique k le rapport de la diminution de volume au volume initial pour une augmentation de pression de 1 Kilogramme par mètre carré.

$$v = v_0 (1 - kp)$$

Valeurs de k :

Ether	0,000.000.011	Eau	0,000.000.005
Alcool	0,000.000.008	Mercure	0,000.000.000.3

Dilatation cubique absolue du mercure. Principe des expériences de Dulong et Petit.

Usage de la dilatation absolue du mercure pour l'étude des vases thermométriques et la détermination des dilatations absolues des autres liquides.

Variation rapide du volume avec la température, qui ne se prête à aucune formule simple

Cas particulier de l'eau (v. volume à 4° centigrades).

$$v = v_4 \left(1 + \frac{(t-4)^2}{144000} \right)$$

entre $t = 0$ et $t = 20^\circ$

Le maximum de densité est à 3° sous la pression de 50 atmosphères (500 mètres d'eau) à 2° sous la pression de 100 atmosphères, etc.

_____ Fond des lacs et des mers. _____

_____ Solides. _____

Dilatation linéaire. - Laplace. - Compressibilité cubique.

La petitesse des variations de volume permet d'écrire avec une suffisante approximation (p. en kilogrammes par mètre carré)

$$v = v_0 (1 - kp + at)$$

k coefficient de compressibilité cubique

a _____ dilatation _____

k

a

Verre	0,000.000.0005	0,000 021 à 27
Cuivre	0,000.000.000.062	54
Acier	0,000.000.000.050	36
Zinc	trop mou	90

_____ Difficulté d'éviter les déformations permanentes dans les expériences d'élasticité

Importance industrielle de ces déformations permanentes.

Expériences d'allongement d'un fil.

Formule qui les résume:

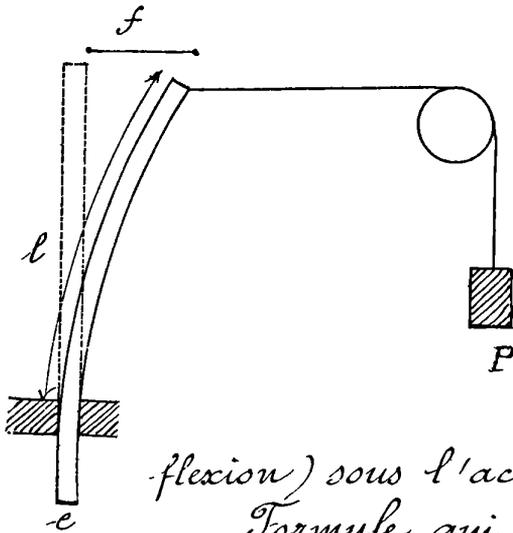
- P poids tenseur en kilogrammes.
- s section droite du fil en mètres carrés.
- l_0 longueur initiale du fil en mètres.
- l ———— actuelle du fil allongé.
- E coefficient d'élasticité d'Young.

$$l = l_0 \left(1 + \frac{P}{E \cdot s} \right)$$

à température constante

Or 86 000 000 000	Acier 24 000 000 000
Argent 76 000 000 000	Chêne 1 000 000 000
Cuivre 12 500 000 000	Verre 4 000 000 000
Fer 18 000 000 000	à 6 000 000 000

C'est le même coefficient E qui intervient dans les expériences de flexion.



Lame encastrée de longueur libre l , d'épaisseur e de longueur a (perpendiculaire au plan du dessin).

L'extrémité libre s'écarte d'une longueur f . (flèche de flexion) sous l'action du poids P.

Formule qui résume les résultats

$$f = \frac{P l^3}{a e^3} \times \frac{1}{E}$$

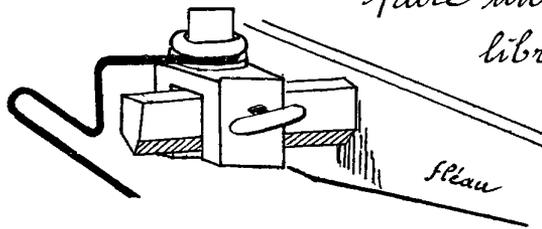
Expérience au Cours.

— Torsion d'un fil cylindrique. —

La torsion est produite par l'action simultanée de deux forces égales, parallèles, mais non directement opposées,

ce qu'on appelle un couple, et le rôle mécanique du couple est défini par le produit de la valeur de chacune des forces par la longueur d'une perpendiculaire commune.

Expérience au cours : fil de laiton attaché par un bout à une barre de fer, par l'autre au fléau d'une balance de Roberval sur le prolongement de l'axe, au moyen d'une pince de pil et d'un gros fil de fer.



Équilibrons la balance, puis tordons le fil de 180° à l'extrémité éloignée en faisant faire un demi-tour à la barre, l'équilibre de la balance est détruit. -

On le rétablit au moyen de poids convenables. - Le couple qui équilibre une

torsion de 180° est mesuré en faisant le produit des poids en kilogrammes par le bras de levier du fléau de la balance en mètres.

Formule de la torsion:

R rayon du fil étudié en mètres.

l longueur

θ angle de torsion, exprimé en parties du rayon, en prenant pour unité d'angle celui qui est mesuré sur une circonférence par une longueur d'arc égale au rayon de la circonférence (π ou $3,14159...$) pour une demi-circonférence, et non pas 180° .

C le couple de torsion.

N coefficient d'élasticité de torsion.

$$C = N \cdot \frac{\theta}{l} \cdot R^4$$

Cuivre	45 à 50 00 000 000		Laiton	35 00 000 000
Acier	85 00 000 000		Verre	15 à 25 00 000 000

Ces coefficients d'élasticité E, N , correspondent à des propriétés qui n'existent que dans les solides - quand on les connaît, on peut en déduire facilement le coefficient k de compressibilité cubique.

————— Calorimétrie. —————

Expériences de Black.

1) 1 Kilogramme d'eau à 100° versé dans un vase qui contient déjà 1 Kilogramme d'eau à 0° , la température finale du mélange est 50° - pourvu que le vase soit bien protégé contre toutes les causes de réchauffement ou de refroidissement extérieur.

2) 1 Kilogramme de mercure à 100° versé dans un Kilogramme d'eau à 0° , la température finale du mélange est seulement de 3° environ.

L'eau et le mercure en se refroidissant du même nombre de degrés, ne sont donc pas capables d'élever la température d'un Kilogramme d'eau de la même quantité. On dit que les quantités de chaleur qu'ils cèdent à l'eau sont différentes.

Principes de la méthode des mélanges.

Equation générale:

- p . poids du liquide contenu dans le vase calorimétrique.
- t_0 température initiale de ce liquide.
- c chaleur spécifique du liquide (quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température de 1 Kilogr. de liquide).
- P poids d'un corps quelconque.

T_0 : température initiale du corps.
 c : chaleur spécifique.

t : température finale du mélange

$$PC(T_0 - t) = pc(t - t_0)$$

La quantité de chaleur perdue par P kilogrammes du corps dont la température passe de T_0 à t degrés est entièrement employée à échauffer les p kilogrammes d'eau de t_0 à t degrés.

Recherche de la chaleur spécifique du corps :

$$c = \frac{pc(t - t_0)}{P(T_0 - t)}$$

D'ordinaire on emploie l'eau comme liquide calorimétrique, et on prend pour unité, sous le nom de calorie, la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température d'un kilogramme d'eau. Alors

$$c = 1 \quad (\text{Exp. sur la fonte}).$$

Pour les sels solubles, pour le potassium, le sodium, etc. on ne peut employer l'eau, mais un carbure d'hydrogène, pétrole, térébenthine, etc. - alors il faut avoir déterminé c par une expérience préalable.

— Résultats. —

Loi de Dulong et Petit.

Le produit du poids atomique par la chaleur spécifique prise à l'état solide est à peu près la même pour tous les corps simples 6,4. - Pour des corps simples différents la même quantité de chaleur est nécessaire

pour élever du même nombre de degrés la température de quantités qui contiennent le même nombre d'atomes. Presque toute cette chaleur est donc employée à élever la température de l'atome, - nous verrons plus tard quel sens on peut attribuer à ces mots. -

De même dans les corps composés de même formule, le produit de la chaleur spécifique par le poids atomique est constant. - (Oxydes MO , 11; Sulfures MS , 12; Chlorures M^2Cl^2 , 25,5; Bromures M^2Br^2 , 27; Iodures M^2I^2 , 27.) et s'éloigne peu du nombre qu'on obtient en multipliant la valeur constante (6,4) relative aux corps simples par le nombre des atomes qui forment le composé, (Loi de Woestyn).

$$\left\{ \begin{array}{l} MO, MS, \text{ deux atomes : } 2 \times 6,4 = \\ M^2Cl^2, M^2Br^2, \text{ etc quatre atomes : } 4 \times 6,4 = \end{array} \right\} \begin{array}{l} 13. \\ 25,5. \end{array}$$

Pour ces deux lois les écarts sont d'autant plus grands que la compressibilité et la dilatation thermique sont plus grandes. que le volume du composé diffère plus de la somme des volumes des composants (pris à l'état solide). La chaleur n'est donc pas seulement employée à élever la température des atomes, bien que ce soit son principal emploi, mais aussi à produire quelques autres phénomènes, - tels que la dilatation des corps, - assez faibles pour laisser voir la loi de Dulong et Petit, comme loi limite, assez importants pour créer des différences secourables d'un corps à l'autre.

Pour les liquides, très dilatables et dont la dilatation varie rapidement avec la température, il est inutile de rien chercher d'analogue à la loi de Dulong et Petit... Nous la retrouverons pour les gaz; mais avant d'y arriver, voyons quelles autres quantités de chaleur il faut mettre en jeu pour faire passer un corps de l'état solide à l'état liquide

puis à l'état de vapeur.

— Loi de la fusion. —

Un solide dans un vase est chauffé à l'étuve ou au bain-marie, de manière que la température soit uniforme dans tout l'espace occupé par le solide. — La fusion commence à une certaine température, fixe pour chaque corps, et bien qu'on chauffe, la température du liquide reste constante tant que le solide n'est pas entièrement fondu. — Pour fondre 1 kilogramme de matière sans changement de température il faut fournir une quantité de chaleur L , appelée chaleur de fusion.

Chaleur de fusion de la glace par la méthode des mélanges. — Expériences — 80 calories.

Equation complète :

P le poids de glace à 0° , introduit dans l'eau.
Autres notations comme page (15).

La glace fond en absorbant PL calories, son eau se réchauffe de 0 à t° , en absorbant . . . Pt Calories.

Tout cela est emprunté à l'eau du calorimètre qui s'est refroidie en cédant $p(t_0 - t)$ Calories.

$$PL + Pt = p(t_0 - t)$$

— Ebullition. —

Un liquide bout à une température telle que sa tension maximum soit égale à la pression de l'atmosphère qui le surmonte, (Eau à air libre, 100°) et absorbe pour se transformer en vapeur sans changement de température une quantité de chaleur considérable.

Expérience de Watt. — Réchauffement de l'eau par barbotement de vapeur.

Résultats Des expériences De Regnault.

1 Kilogramme d'eau pris à la température t exige pour se transformer en vapeur saturante - sans changer de température -

$$606,5 \text{ — } 0,705 t, \text{ calories.}$$

$$606,5 \text{ calories à } 0^\circ$$

$$536 \text{ — } \text{à } 100^\circ$$

$$522 \text{ — } \text{à } 120^\circ, \text{ etc.}$$

— Expériences de Leslie. —

Congélation de l'eau par évaporation dans le vide. Augmentant le volume occupé par l'eau et la vapeur, nous forçons l'eau à s'évaporer; mais celle-ci contenue dans une petite cavité d'un bouchon, ne reçoit de chaleur de nulle part. Toute la chaleur nécessaire à l'évaporation est fournie par le refroidissement de l'eau liquide, et quand la température de cette eau est tombée à 0° , par sa solidification. Chaque milligramme d'eau qui s'évapore alors, absorbe de quoi solidifier $\frac{606}{80}$ ou 7,6 milligrammes d'eau.

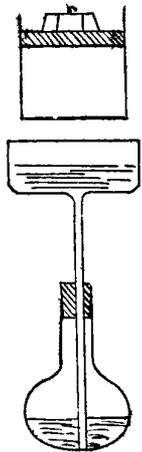
— Chaleurs spécifiques des gaz. —

Quand on chauffe un solide ou un liquide c'est ordinairement sous la pression de l'atmosphère à moins de précautions spéciales exigeant l'emploi de très grandes forces. - Le changement de dimensions et d'état intérieur que subit le corps, ne dépend donc que de la variation de sa température, et il en est de même de la quantité de chaleur nécessaire pour cette transformation. -

C'est tout l'opposé pour les gaz, dont le volume

peut varier beaucoup quand la pression qu'il supporte change - Aussi faut-il préciser dans quelles conditions le gaz est chauffé, pour savoir quelle quantité de chaleur il faut lui fournir:

1° - Sous volume constant, en vase clos.



2 - Sous pression constante, dans un cylindre dont le piston porte une charge fixe, - ou dans un ballon contenant un liquide peu volatil aux températures employées (mercure, acide sulfurique concentré,) qui peut monter par un tube central jusque dans un large réservoir;

3. - ou enfin de toute autre manière, le volume et la pression variant simultanément pendant l'élévation de température.

Il suffit de connaître la chaleur spécifique à pression constante C_p , et la chaleur spécifique à volume constant C_v , pour pouvoir calculer les quantités de chaleur nécessaires à une transformation quelconque.

1° L'élévation de température de t_0 à t_1 , sous pression constante est accompagnée d'une variation de volume $v_1 - v_0$ donnée par la loi de Gay-Lussac

$$p_0 (v_1 - v_0) = R (t_1 - t_0)$$

La quantité de chaleur fournie à M kilogrammes du gaz est:

$$Q_{p_0} = M C_{p_0} \times (t_1 - t_0) = M C_{p_0} \cdot \frac{p_0}{R} \times (v_1 - v_0)$$

2° L'élévation de température de t_1 à t_2 au volume constant v_1 est accompagnée d'une variation de pression $p_1 - p_0$

$$v_1 (p_1 - p_0) = R (t_2 - t_1)$$

et la quantité de chaleur correspondante pour M kilogrammes

de gaz est:

$$Q_v = M C_v (t_2 - t_1) = M C_v \cdot \frac{v_1}{R} (p_1 - p_0)$$

C'est la définition même des deux chaleurs spécifiques, qui sont des constantes pour chaque gaz.

Admettons, que pour de très petites variations simultanées de température $t_2 - t_0$, de volume $v_1 - v_0$ et de pression $p_1 - p_0$, la quantité de chaleur à fournir est la même que si l'on avait d'abord chauffé à pression constante p_0 , de v_0 à v_1 , puis à volume constant v_1 de p_0 à p_1 . - nous aurons pour de très-petites variations simultanées

$$Q = \frac{M}{R} [C_p p_0 (v_1 - v_0) + C_v v_1 (p_1 - p_0)]$$

avec

$$p_1 v_1 - p_0 v_0 = R (t_2 - t_1)$$

Pour les justifier, remarquons, que si l'on avait chauffé à volume constant v_0 d'abord de p_0 à p_1 , puis à pression constante p_1 de v_1 à v_0 , - ce qui est un mode de calcul évidemment aussi légitime que le précédent. - On aurait trouvé:

$$Q' = \frac{M}{R} [C_p \cdot p_1 (v_1 - v_0) + C_v v_0 (p_1 - p_0)]$$

et la différence $Q' - Q$ des deux expressions est:

$$Q' - Q = \frac{M}{R} (p_1 - p_0) (v_1 - v_0) (C_p - C_v)$$

qui devient négligeable par rapport à la valeur Q ou à la valeur Q' sous la condition que les variations relatives $\frac{p_1 - p_0}{p_0}$, et $\frac{v_1 - v_0}{v_0}$ soient très petites.

Pour plus de détails, voir Blondlot. - Introduction à l'étude de la thermodynamique, Gauthier-Villars 1888.

Application à la détermination des rapports des chaleurs spécifiques - Clément et Desormes.

Un gaz comprimé sans communication de chaleur s'échauffe, d'abord; puis enfermé en vase clos, reprend, sous volume constant, sa température initiale.

Etat initial:

$$p_0 \quad v_0 \quad t_0 \quad (1)$$

après compression brusque:

$$p_1 \quad v_1 \quad t_1 \quad (2)$$

connue inconnue inconnue

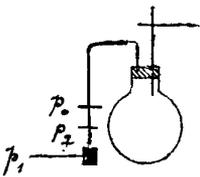
après refroidissement:

$$p_1 \quad v_1 \quad t_0 \quad (3)$$

connue le même

les états (2) et (3) donnent t_1 ; les états (1) et (3) donnent v_1 :

$$p_0 v_0 = p_1 v_1$$



et

$$\frac{v_1 - v_0}{v_1} = \frac{p_0 - p_2}{p_0}$$

Dans l'équation qui donne Q , posant $Q = 0$ il vient alors

$$C_p p_0 (v_1 - v_0) + C_v v_1 (p_1 - p_0) = 0$$

et ici

$$C_p (p_0 - p_2) + C_v (p_1 - p_0) = 0$$

$$\frac{C_p}{C_v} = \frac{p_0 - p_1}{p_0 - p_2}$$

et ces deux différences de pression sont mesurées en même unité par les hauteurs d'acide sulfurique soulevé dans le tube dans le 1^{er} et le 3^e état.

Mesure de la chaleur spécifique à pression constante -

Principe des expériences de Regnault.

Résultats, Loi de Dulong et Petit.

Autre énoncé. — La même quantité de chaleur chauffe du même nombre de degrés le même volume de tous les gaz pris sous la même pression et à la même température.

Représentation graphique de l'état d'un gaz et de ses transformations par une courbe dont chaque point a pour coordonnées la pression et le volume — Etude d'une série de transformations particulières ramenant le gaz à sa pression, son volume et sa température initiales

1° de p_0 à p_1 v_0 constant

2° de v_0 à v_1 p_1 ———

3° de p_1 à p_0 v_1 ———

4° de v_1 à v_0 p_0 ———

La quantité de chaleur fournie n'est pas nulle, comme on le croyait, il y a 50 à 60 ans, mais a pour valeur

$$(C_p - C_v) \cdot \frac{(p_1 - p_0)(v_1 - v_0)}{R}$$

Toute cette quantité de chaleur a disparu en tant que chaleur. — Qu'est-elle devenue?

Définition du travail \mathcal{E} d'une force F dont le point d'application parcourt un chemin l dans le sens de la force

$$\mathcal{E} = F \cdot l.$$

Application au gaz contenu dans un cylindre de section S . — le poids $p_1 S$ est soulevé de $\frac{v_1 - v_0}{S}$ dans la seconde transformation, — le gaz a effectué le travail $p_1 (v_1 - v_0)$

pour soulever ce poids - on accroche ou on fait passer sur une table au même niveau une partie $(p_1 - p_0)S$ de ce poids, qui reste définitivement soulevée, tandis que pendant la troisième transformation, le reste $p_0 S$ redescend de $\frac{v_1 - v_0}{S}$, en sorte que le gaz a effectué pendant le cycle entier le travail

$$(p_1 - p_0)(v_1 - v_0),$$

le rapport de ce travail effectué à la quantité de chaleur disparue a pour valeur $\frac{C_p - C_v}{R}$, et ce rapport qui est déjà indépendant des valeurs de p_0, p_1, v_1, v_0 , est même indépendant de la série des transformations qui ramènent le gaz à son état initial, et même de la nature du gaz, comme le montre la substitution des nombres fournis par l'expérience pour C_p, C_v, R . - La valeur est une calorie pour 425 à 430 Kilogr m essou ? d'un mètre, ou 425 à 430 Kilogrammètres.

Circonstances dans lesquelles on observe la conversion de la chaleur en travail.

Machines à air chaud -

_____ à vapeur - (Hirn)

_____ à mélanges gazeux explosifs.

Armes à feu.

Inverse: Conversion du travail en chaleur - principalement par le frottement.

Expériences de Rumford.

_____ de Eynhall.

_____ de Joule. - Appareils et méthodes. - Résultats.

Principe de l'Equivalence. - Toutes les fois que dans une série de transformations qui ramènent les corps à leur état initial, de la chaleur apparait ou disparaît, il disparaît ou apparait une quantité équivalente de travail mécanique à raison 430 Kilogrammètres par calorie.

Phénomènes dus à la présence de deux corps différents.

5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} Leçons.

I. Mélange des gaz.

— Expérience de Berthollet. —

L'uniformité de pression dans une masse gazeuse hétérogène s'établit extrêmement vite ; l'équilibre hydrostatique de la masse est dès lors assuré, et devrait être stable quand les masses sont rangées par ordre de densités décroissantes de bas en haut, (l'acide carbonique en bas, l'hydrogène en haut) si on avait tenu compte de toutes les actions qui entrent en jeu ; c'est en effet ce qui se produit au début, puisqu'on peut verser de l'acide carbonique comme un liquide. — Mais quand on attend assez longtemps, l'appareil étant maintenu à température constante, on trouve que, malgré la pesanteur, le mélange devient homogène.

Diffusion. — Les gaz ont donc par eux-mêmes une certaine mobilité qui leur permet de se mélanger, même quand la pesanteur devrait les maintenir séparés. — C'est ce que montrent mieux encore les deux expériences de Debray. Quand un vase poreux de pile est rempli d'air, et qu'on le recouvre avec une cloche pleine d'hydrogène, ce dernier gaz se précipite dans le vase poreux et y fait monter très rapidement la pression. — L'hydrogène se transporte ainsi vers les pressions totales (de l'air et de l'hydrogène mêlés) les plus fortes, tant que la pression de l'hydrogène seul à l'extérieur est supérieure à la pression de l'hydrogène seul

dans le mélange intérieur. - En même temps, l'air sort mais moins vite que n'entre l'hydrogène, d'où l'excès de pression d'ailleurs temporaire.

Expérience inverse avec le vase poreux d'abord rempli d'hydrogène

L'expérience a montré à Graham que la vitesse avec laquelle un gaz sort à travers une paroi poreuse à trous assez larges ou simplement à travers une très petite ouverture percée dans une lame métallique mince, - toutes choses égales d'ailleurs quant aux différences de pression totale ou individuelle des gaz. - est inversement proportionnelle à la racine carrée de la densité par rapport à l'air - ou du poids moléculaire (Graham)

Les faits nous conduisent naturellement à penser que les gaz sont formés de particules animées de mouvements de translation rapides en tous sens, comme pourraient être des grains de sable contenus dans une boîte qu'on vient de secouer violemment en tous sens. - Cette idée si naturelle développée par plusieurs physiciens, principalement par Clausius, s'est montrée d'une extrême fécondité. Chaque grain qui vient frapper la paroi et rebondit en sens inverse, pousse cette paroi et si celle-ci est mobile comme un piston, il faudra un certain effort pour le maintenir en repos malgré ces chocs fréquents et multipliés sur toute la surface du piston. C'est seulement la valeur moyenne de cet effort, valeur bien déterminée, que nous pourrions mesurer, si une surface même d'une fraction de millimètre carré est exposée à plusieurs millions de chocs par seconde. - D'où la notion de pression, - par unité de surface. Cette notion développée avec précision conduit à la loi de Mariotte sous la seule condition que la température du gaz comptée à partir de 274° au.

dessous de zéro soit proportionnelle à la force vive moyenne d'une molécule mobile. Je rappelle qu'on désigne en mécanique par le nom de force vive d'une masse mobile le demi produit de cette masse par le carré de sa vitesse.

Bien plus, cette théorie conduit — sans avoir besoin de connaître le nombre de molécules par unité de volume — à la détermination exacte de la vitesse qu'il faut attribuer à chacune des molécules, dans un gaz à la température de la glace fondante et à la pression d'une atmosphère.

Air	485	mètres par seconde.
Oxygène	461	_____
Azote	492	_____
Hydrogène	1848	_____

Ces vitesses sont inversement proportionnelles aux racines carrées du poids moléculaire, tout comme les vitesses de diffusion.

Il devient facile, très facile même, de comprendre la diffusion des gaz; ce qui devient difficile, c'est de comprendre comment les gaz mettent si longtemps à se diffuser avec de pareilles vitesses. C'est ce qu'on n'a pas manqué d'objecter à Clausius, après son premier mémoire, et ce qui a provoqué un perfectionnement nouveau de la théorie. Si petites que nous les supposions ces molécules mobiles doivent se repousser à très petite distance; sans quoi on ne pourrait comprendre l'état solide, encore compressible, dans lequel les molécules sont certainement en repos, ou du moins, en mouvement oscillant autour d'une position moyenne, comme le montrent la permanence de forme des solides, et mieux encore la régularité des cristaux. Dans le gaz, ces molécules ne peuvent donc pas parcourir de

longs chemins sans passer assez près les unes des autres, et être par conséquent déviées de leur direction première. Plusieurs phénomènes dépendront de la longueur du parcours libre entre deux rencontres successives; ce sont les phénomènes de diffusion, de frottement interne des gaz, et de conductibilité pour la chaleur. Si les deux premiers, qui sont les plus accessibles à l'expérience, conduisent à attribuer les mêmes valeurs aux parcours libres, la théorie cinétique des gaz, expliquant naturellement tant de phénomènes différents d'équilibre et de mouvement, acquerra un haut degré de vraisemblance.

C'est ce qui arrive, et bien que moins exactement déterminés que ne le sont les vitesses de translation, ces parcours libres sont assez bien connus, et ont à peu près pour valeurs en millièmes de millimètre

Air	: 90	Azote	89
Oxygène	: 96	Hydrogène	170

II. Mélange des gaz et des vapeurs.

La pression du mélange, une fois l'équilibre atteint, est, comme pour les gaz, égale à la somme des pressions qu'exerceraient séparément à la même température chacun des gaz ou vapeurs du mélange s'il occupait seul le volume entier.

Appareil de M. Duclaux.

La rigueur de la loi est d'autant moindre que les vapeurs sont plus près d'être saturantes, et que la température d'observation diffère moins du point critique. La loi est tout à fait applicable aux mélanges d'air

et de vapeur d'eau qui se rencontrent dans l'atmosphère; la vapeur n'entrant jamais pour plus d'un trentième à un vingtième dans le mélange.

L'évaporation est lente par suite de la lenteur de la diffusion - la quantité évaporée dépend surtout de l'excès de la tension de saturation F à la température de l'observation sur la tension f de la vapeur dans l'air.

— Hygrométrie. —

Recherche de la quantité de vapeur d'eau contenue dans un mètre cube d'air.

La quantité intéressante est soit la tension actuelle f [pluie, absorption de la chaleur solaire, etc] soit le facteur d'évaporation $F-f$; presque jamais l'état hygrométrique $\frac{f}{F}$.

Méthodes diverses de détermination de f .

Hygrométrie chimique.

Hygromètre de condensation - (Principes de la paroi froide) Appareil d'Alluard (excellent) - Psychromètre d'August - Difficulté d'interprétation des températures lues, quand l'air est calme, ou quand le thermomètre humide se gèle. - Emploi du thermomètre froide humide. - Incertitude sur l'influence de la pression totale de l'air.

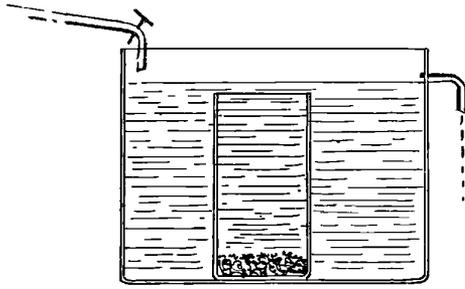
III. Mélange des liquides ou des dissolutions.

Diffusion malgré la pesanteur.

Exemple. - Au fond d'un vase cylindrique un excès de sel marin, et une dissolution saturée. - au-

dessus de l'eau pure, constamment renouvelée à l'ouverture du vase, au moyen d'un écoulement et d'un trop plein.

- Quand on attend assez longtemps on atteint un état dans lequel l'eau presque pure à l'ouverture du vase, contient



une proportion de sel qui croît proportionnellement à la profondeur jusqu'au fond où la solution est saturée. Cet état ne se maintient que par le renouvellement continu de l'eau presque pure en haut, et l'enlèvement par celle-ci d'un poids constant de sel pendant chaque seconde.

Soit Q le nombre de kilogrammes de sel emportés ainsi par seconde.

S la section droite du vase,

p_1 la concentration (nombre de kilogrammes de sel par mètre cube) à une certaine profondeur h_1 ,

p_2 la concentration à la profondeur $h_1 + l$,

l'expérience montre que l'on a

$$Q = k S \frac{p_2 - p_1}{l}$$

k étant un coefficient variable avec chaque sel, et qu'on appelle le coefficient de diffusibilité.

La concentration p à chaque profondeur peut être déterminée par analyse chimique au moyen de liqueurs titrées par la coloration, par les indices de réfraction; et plus facilement encore par la densité, au moyen de flotteurs de verre lestés de manière à avoir des densités régulièrement croissantes.

Même loi pour les gaz dans les mêmes conditions.

Le coefficient k ainsi défini ne dépend que de l'unité de longueur et de l'unité de temps - il est exprimé dans le tableau suivant en mètres carrés par seconde.

Sel de cuisine - eau	0,000 000 001 16
Sucre de canne	0,000 000 000 36
Sulfate de cuivre	0,000 000 000 24
Acide carbonique - air	0,000 014
Acide carbonique - hydrogène	0,000 056

Il faut supprimer quatre zéros, si on mesure les longueurs en centimètres, - et deux de plus, si ce n'est tout, si on mesure les longueurs en millimètres.

Lenteur de la diffusion. - Ces valeurs conduisent à des conséquences intéressantes pour la physique du globe.

Imaginons que dans un tube cylindrique indéfini, on ait réussi à un certain moment à mettre de l'acide carbonique pur jusqu'à une certaine section droite et de l'air pur au delà. La loi de diffusion indiquée permet de calculer, - et ces calculs ont reçu la consécration de l'observation - en quelle proportion se trouvera l'acide carbonique à différentes distances du plan de séparation initial à différentes époques. La distribution de la concentration p (poids d'acide carbonique en kilogrammes par mètre cube du mélange) ne dépend que du rapport

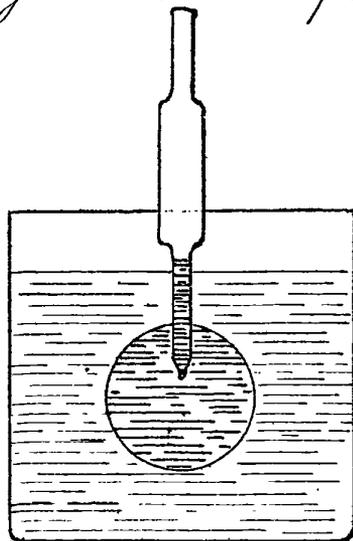
$$y = \frac{x}{2\sqrt{kt}}$$

où k est le coefficient de diffusibilité, t , l'époque de l'observation, et x la distance de la tranche étudiée au

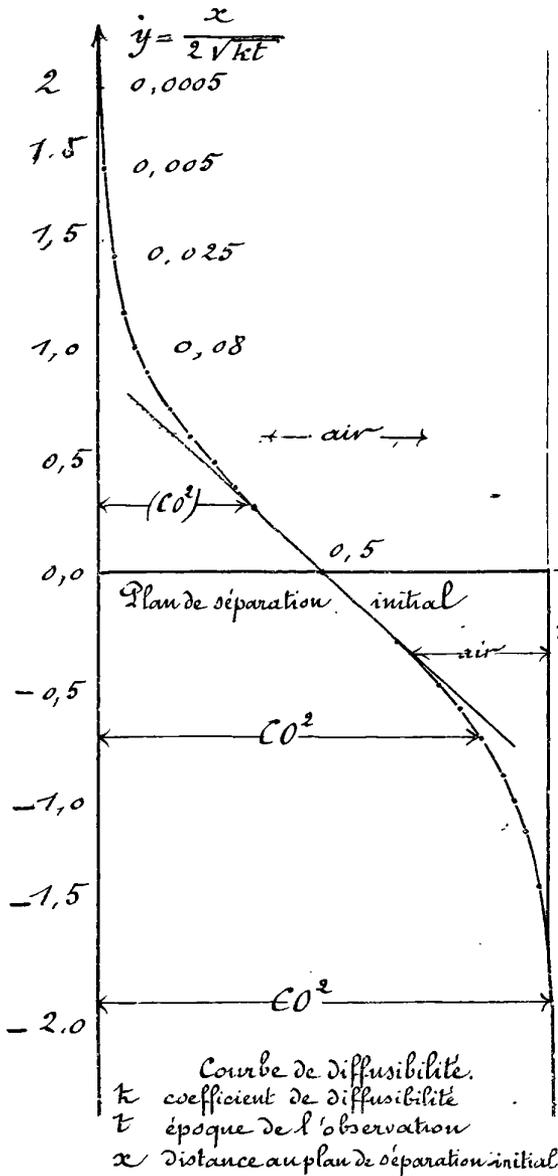
d'eau et d'alcool, - huile) peuvent rester indéfiniment en présence sans se mélanger, l'un d'eux formant des gouttes sphériques au milieu de l'autre - C'est tout l'opposé du phénomène, étudié précédemment, de diffusion malgré la différence de poids spécifique. Ces gouttes peuvent être très fines, et persister très longtemps sans se réunir en gouttes plus grosses lorsque le liquide qui les enveloppe est très visqueux, et la tension superficielle (voir plus loin) à la surface de séparation assez petite. -

Duclaux, Sur la tension superficielle des liquides - Annales de Physique et de Chimie - 1870 - T. XXI - Conditions de stabilité des émulsions p. 415-435.

Telles sont les émulsions des pharmaciens ; la plupart des sauces ; beaucoup de liquides organiques, le lait en particulier. Avec des précautions convenables, on peut obtenir de très grosses gouttes d'huile, ayant jusqu'à 10, 15 et 20 centimètres de diamètre, et quand l'uniformité de température et l'homogénéité de composition du mélange d'eau et d'alcool sont bien réalisées, des mesures précises permettent de s'assurer que la forme des gouttes est rigoureusement sphérique (Plateau).



La comparaison avec les ballons de caoutchouc des enfants, gonflés par le gaz qu'ils contiennent vient naturellement à l'esprit, et pour la confirmer, on peut s'assurer facilement que la pression dans l'intérieur de la bulle, est un peu plus grande qu'à l'extérieur : pour augmenter le volume de la goutte on lui



— Eléments de la courbe —
 Concentration

x	y
0,50	0,0
0,45	0,09
0,40	0,18
0,35	0,28
0,30	0,37
0,25	0,48
0,20	0,59
0,15	0,73
0,10	0,91
0,08	1,00
0,05	1,16
0,025	1,38
0,005	1,82
0,0005	2,0

plan de séparation initial.
 - Elle est représentée par la courbe ci-jointe.

Au bout de 7 secondes, la concentration est 0,08 à 2 centimètres du plan initial, 0,0005 à 4 centimètres.

Il en est de même au bout de 87000 secondes (un jour) pour le sel de cuisine se diffusant dans l'eau. - Mais ce n'est qu'au bout de 22 ans, pour l'acide carbonique dans l'air - de 277000 ans pour le sel de cuisine dans l'eau que la concentration sera devenue

0,08 à 200 mètres de distance
 0,0005 à 400 mètres

du plan de séparation initial en prenant pour unité la concentration initiale, qui reste constante à distance infinie.

La diffusion seule, dans des milieux en repos est

donc tout à fait insuffisante pour expliquer l'homogénéité de l'atmosphère et des mers.

Osmose. - Le parchemin, le papier parchemin, les membranes organiques d'origine végétale ou animale, le caoutchouc, sont inégalement perméables aux liquides et aux sels dissous.

Découverte de l'osmose de l'alcool par Mollet.
- Pression osmotique. - Etude par Dutrochet - Solutions salines. - Sucre.

Le rôle de la membrane est très complexe ; mais quand on réussit à trouver une membrane perméable au liquide seul et non au sel dissous, on observe entre l'excès de pression H maintenu par la membrane, la concentration de la dissolution p , et la température t , les mêmes lois de Mariotte et de Gay-Lussac qu'entre la pression d'un gaz, son poids spécifique et sa température ; et la formule qui les résume a un même coefficient numérique, à condition de compter les concentrations des divers sels, non pas en kilogrammes, par mètre cube, mais en nombre d'équivalents par mètre cube.

Tous ces faits conduisent à une théorie cinétique des dissolutions absolument analogue à celle des gaz, bien que la présence du dissolvant rende la confirmation expérimentale un peu moins précise.

IV. Gouttes liquides. Tension superficielle.

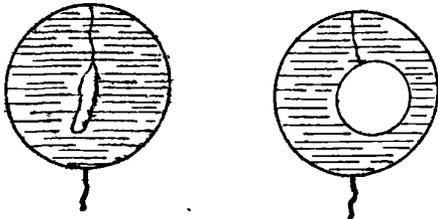
Deux liquides de même poids spécifique (mélange

fournit de l'huile au moyen d'une pipette, et malgré l'égalité de densité constatée par la suspension de la goutte d'huile (principe d'Archimède), l'huile reste dans la pipette un peu au dessus du niveau de l'eau extérieure.

Il semble donc qu'il existe à la surface de séparation de deux liquides une couche tendue; il en est évidemment de même à la surface libre d'un liquide.

L'expérience bien connue des bulles de savon vient confirmer cette idée. L'équilibre de la lame mince de liquide dans laquelle on a insufflé de l'air n'est possible que si elle est tendue, bien loin d'être pressée comme l'exigerait l'hydrostatique seule.

Étude des lames minces, - Plateau - Figures d'équilibre diverses, - cube, tétraèdre, etc. - lame plane, avec un fil flottant dans la lame liquide. -



1° Fil moué. Ce fil prend la forme exactement circulaire quand on enlève le liquide intérieur. Il est donc tiré par le liquide extérieur, également en tous sens et perpendiculairement à la circonférence, c'est-à-dire suivant le rayon.

2° Fil attaché à un bout et passant avec un faible frottement dans un anneau de la monture. - Ce fil est tiré par la membrane liquide, et vient se coller contre le contour du fil de fer. - Mais en tirant ce fil, on développe de nouveau la lame.

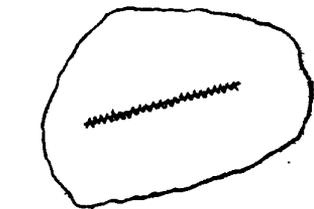
Ces lames, dont l'épaisseur est de moins de un millièbre de millimètre sont donc tendues. La symétrie du liquide, la forme plane de la lame quand la partie solide du contour est plane, montre que la tension

est dirigée dans le plan tangent à la surface. - La forme circulaire de l'anneau de fil montre que cette tension est appliquée perpendiculairement à chaque élément de longueur du fil, et qu'elle a la même valeur en tous les points. La seconde expérience, qui se prête facilement aux mesures permet de s'assurer que jusqu'à la rupture de la lame, et malgré la diminution d'épaisseur jusqu'à $0^{\text{mm}} 00005$ environ, la valeur de cette tension reste la même.

La tension superficielle d'un liquide est la moitié de la force qu'il faut appliquer par chaque unité de longueur à un fil tiré d'un côté par une lame liquide; cette force est perpendiculaire au fil, et tangente à la surface de la lame liquide. Pour un liquide déterminé elle ne dépend que de la température.

Nous prenons la moitié de la force mesurée sur une lame mince, parce que cette lame présente deux surfaces libres, et que dans un liquide pris en grande quantité, c'est la tension superficielle d'une seule surface libre qui interviendra.

Analogie complète avec une lame de caoutchouc tendue qu'on a coupée; on peut rapprocher les deux lèvres de l'ouverture, en cousant celle-ci à points serrés; pour cela il faut tendre le fil à chaque point de couture, et la tension superficielle de la membrane est le produit de la tension du fil par le nombre de points qu'on a dû faire sur chaque centimètre de longueur de la fente. - La fente est d'autant mieux refermée que



les points sont plus nombreux, c'est-à-dire que la tension du fil est plus uniformément répartie.

Tension superficielle de quelques liquides, en Kilogrammes par mètre de longueur.

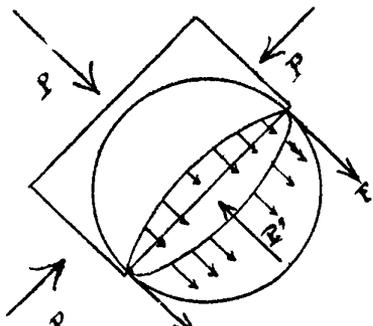
Surface libre	Surface de contact avec l'eau.
Mercure 0.047	
Eau 0,0075 0,0000
Glycérine 0,0072	
Huile d'olive 0,0035 0,0020
Sulfure de carbone . . 0,0032 0,0042
Cérébenthine 0,0029 0,0011
Chloroforme 0,0027 0,0026
Alcool absolu 0,0025	

Remarque. - La tension superficielle à la surface de séparation de deux liquides ne peut pas se déduire de la différence des tensions superficielles des surfaces libres de chacun des liquides.

Pour avoir les tensions superficielles en milligrammes par millimètre de longueur, il faut supprimer trois zéros à gauche des nombres de ce tableau.

Pression dans l'intérieur d'une bulle de savon. -

Ecrivons l'équilibre d'un cylindre circonscrit à la bulle et limité à deux sections droites l'une tangente extérieurement à la bulle, l'autre qui passe par son centre.



Le poids de l'air et de la lame liquide est négligeable, il ne reste que les pressions et la tension superficielle. Les forces projetées sur une perpendiculaire

aux bases sont: Pour la base extérieure $-P \times \pi r^2$
 la section diamétrale $+P' \times \pi r^2$

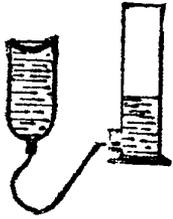
Et pour la circonférence de grand cercle
 suivant lequel la bulle est coupée par
 ce plan $-2F \times 2\pi r$
 pour la surface latérale 0

La somme étant nulle, on a:

$$P' - P = \frac{4F}{r}$$

r est le rayon de la bulle.

Cette propriété est générale; en deux points séparés
 seulement par une lame liquide, ou par une surface
 libre, la pression hydrostatique par unité de surface est
 différente; elle est plus grande du côté concave (du côté
 du centre) que du côté convexe et la différence est me-
 surée par $\frac{4F}{r}$ ou $\frac{2F}{r}$, suivant qu'il s'agit d'une
 lame à deux surfaces libres ou d'une seule surface. -
 Partout ailleurs dans l'intérieur du liquide ou du gaz,
 à partir d'une distance de moins de un milliè-
 millimètre de la surface, les pressions en différents points
 obéissent sans restriction aux règles de l'hydrostatique.
 Lorsque la surface n'est pas sphérique, on peut trouver
 une expression analogue de la différence de pression. En
 particulier, quand la surface libre est plane, la pression se
 transmet intégralement à travers la surface. Cela résulte
 de la formule précédente; on peut aussi facilement l'éta-
 blir par l'étude directe de la condition d'équilibre d'un
 cylindre plat à bases parallèles à la surface libre, de
 part et d'autre. La tension superficielle parallèle aux
 bases donne une projection nulle sur une perpendi-



Expérience sur l'influence de la concavité et de la convexité d'une membrane avec deux éprouvettes pleines de liquide, dont une fermée par une lame de caoutchouc.

Liquides et solides mouillés. - Ascension de l'eau dans les tubes capillaires, théorie. - Equilibre du liquide contenu dans le tube de verre jusqu'à la gaine liquide très mince adhérente au tube.

Loi de Jurin. - Abaissement du mercure dans un tube qu'il ne mouille pas.

Tube à renflements.



Dans un tube étroit, une très petite différence de courbure des deux surfaces terminales permet d'équilibrer une très grande différence de pression pour peu que les gouttes liquides soient nombreuses.

Gouttes liquides sur un plan. - Mercure. - Rosée. Application aux mouvements de l'eau dans un sol sablonneux. - Nappes d'eau souterraines. - Leurs oscillations. - Sources diverses, - Effets de pluies alternant avec des périodes de sécheresse, etc.

Filtres. - Changement de composition des liquides filtrés, etc.

(Duclaux, chap. V.)

Abaissement du sommet. ménisque du mercure due à la tension superficielle dans des tubes étroits.

Diamètre du tube (millimètres)	Abaissement (millimètres)
2	4,6
3	2,9
4	2,0
5	1,5
10	0,42
15	0,13
20	0,036

Frottement interne des liquides et des gaz.

Dans tous ces espaces étroits, tubes capillaires, table, paroi poreuse, les mouvements des liquides ou des gaz sont lents ; c'est que le liquide en contact avec la paroi solide adhère fortement et reste immobile, les couches liquides voisines se meuvent en glissant sur cette couche immobile, et le mouvement plus rapide se produit au milieu du tube, le plus loin possible des parois. Si les forces qu'exerce une portion de liquide sur une autre portion adjacente en mouvement étaient perpendiculaires à la surface de séparation, comme au repos, deux couches cylindriques seraient absolument indépendantes l'une de l'autre, le cylindre central, coulerait d'un seul bloc, au milieu du cylindre annulaire adhérent au tube, sans être gêné en rien par l'immobilité de celui-ci, les réactions mutuelles étant perpendiculaires à la direction du mouvement ; le débit sous l'influence d'une différence de pression serait indépendant de la longueur du tube ; c'est le contraire qui arrive, dès que le tube a une longueur supérieure à 15 ou 20 fois

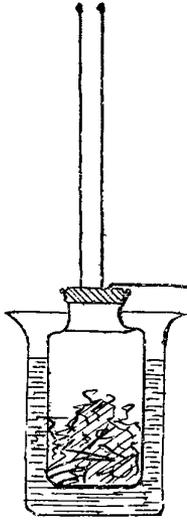
son diamètre, le débit varie en raison inverse de la longueur. Ainsi deux couches liquides voisines, animées de vitesses différentes exercent une action mutuelle dans le sens de la vitesse relative, qui s'annule en même temps que la vitesse. L'expérience a montré que cette action obéit à la loi suivante: Quand les vitesses sont devenues indépendantes du temps; dans un liquide qui se meut parallèlement à un plan, et quand la vitesse V d'une couche est proportionnelle à sa distance d à un plan fixe, la force tangentielle F nécessaire pour entretenir le mouvement d'une portion, d'aire S , prise dans un plan parallèle au plan fixe, est proportionnelle à la surface S à la vitesse V , et en raison inverse de la distance d

$$(1) F = k S \frac{V}{d}$$

Un grand nombre de mesures récentes sont faites par un procédé expérimental directement dérivé de cette loi élémentaire. Le liquide est compris entre deux cylindres concentriques de diamètre grand par rapport à la différence de leurs rayons d . L'un des cylindres est immobile, l'autre monté sur l'axe d'un tour est mis en mouvement par exemple par la chute d'un poids, dont la valeur fait connaître F . Les dimensions du cylindre donnent S , et jointes à sa vitesse de rotation fournissent V . Une petite correction facile est nécessaire pour tenir compte de l'inégalité des diamètres. L'exactitude de la loi élémentaire résulte de ce que le changement de vitesse ou de dimensions des cylindres ne change pas la valeur de k déduite d'expériences sur un même liquide.

Lorsque le liquide est très visqueux, comme l'huile, la glycérine, l'acide sulfurique, etc. l'expérience

est très facile. On prend pour vase un verre de Bohême; pour cylindre mobile un flacon lesté par du plomb ou du sable et suspendu par deux fils de lin parallèles passant par deux trous percés dans le bouchon; enfin un long levier (une plume) fixé au bouchon permet de suivre les mouvements du vase mobile. La détermination de S , et d est évidente; celle de V se fait en suivant les déplacements lents de l'index devant une échelle divisée.



Quant à la force qui correspond à une déviation donnée il est facile de la déterminer en l'équilibrant avec une balance sensible,

ou par l'application d'une formule qui résulte de l'étude mécanique de la suspension

$$F = \frac{1}{r} \frac{P a^2}{l} \sin \alpha$$

F force appliquée tangentiellement à la surface du flacon cylindrique dont le rayon est r
 P poids apparent de ce flacon liquide.

a distance de deux fils de suspension.

l longueur de ces fils.

α angle d'écart.

Il faut seulement faire deux expériences en faisant monter le liquide à deux niveaux différents, pour pouvoir éliminer l'influence du fond dont il est trop difficile de faire la théorie.

L'application de cette loi élémentaire à l'écoulement par les longs tubes capillaires, a conduit à la loi suivante, dans laquelle

p est la différence des pressions aux deux bouts du tube,

r le rayon de la section droite du tube,

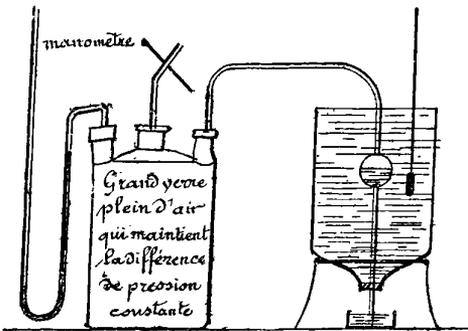
- l , la longueur du tube,
 et v le volume liquide qui s'écoule pendant un temps t .

$$v = \frac{3,1416}{8} \frac{r^4}{l} \cdot p \cdot \frac{1}{k} \cdot t.$$

Avant toute théorie, Poiseuille au commencement de ce siècle avait d'ailleurs découvert cette loi par expérience, et ses déterminations du coefficient de frottement k de l'eau distillée à diverses températures sont très bonnes.

L'expérience est facile à installer, surtout lorsqu'on se contente de déterminer le rapport des coefficients de frottement de deux liquides (l'un d'eux peut être l'eau), au moyen du même tube, car la seule mesure délicate, celle du diamètre du tube (et) devient inutile, et on a alors, en accentuant les qui se rapportent au second liquide,

$$\frac{k'}{k} = \frac{p'}{p} \frac{v}{v'} \frac{t'}{t}.$$



On simplifie encore en employant toujours le même volume $v = v'$ celui d'une boule soufflée au bout du tube étroit

La seule précaution indispensable est le nettoyage parfait

du tube quand on passe d'un liquide à l'autre.

On trouve ainsi en Kilogrammes par mètre carré pour une différence de vitesse d'un mètre par seconde entre deux couches distantes d'un mètre:

Eau

Eau	$k = 0,000\ 1816$	$\bar{a} = 0^\circ$ centigrades
	$0,000\ 1335$	$\bar{a} = 10^\circ$
Alcool	$0,000\ 1556$	
Glycérine	$0,43$	$\bar{a} = 3^\circ$
	$0,0504$	$\bar{a} = 26^\circ 5$
Air	$0,000\ 002$	$\bar{a} = 0^\circ$ et sous la pression d'une atmosphère.

L'eau pouvant être employée comme terme de comparaison, voici la formule qui donne k en fonction de la température centigrade t , d'après les expériences de Poiseuille

$$k = \frac{0,0001816}{1 + 0,0337t + 0,000221t^2}$$

ou sensiblement

$$k = \frac{0,000182}{1 + 0,0367t}$$

L'état permanent dans lequel la vitesse de liquide qui passe en un point donné est devenue indépendante du temps, ne s'établit pas de prime abord ; il est précédé d'une période variable d'autant plus longue que le frottement du liquide est moindre, par rapport à sa densité, cette influence de la densité remet presque au même plan deux fluides très différents, l'eau et l'air ; et même dans l'air le frottement rapporté à la densité est d'environ 4 fois plus grand que dans l'eau. Pour nous faire une idée du degré d'indépendance de deux masses d'air ou d'eau contigües, nous prendrons le même exemple que pour la diffusion ; la loi est la même. Supposons qu'à un certain moment deux masses indéfinies d'air ou d'eau situées de part et d'autre d'un plan soient l'une en repos, l'autre animée d'une vitesse de 1 mètre par seconde. La distribution des vitesses est donnée au bout du temps t

par la courbe p. - Avant que la vitesse soit devenue
0,08 à 2 centimètres du plan de séparation
et 0,0005 à 4 _____

il s'écoulera dans l'air à 10° 19 secondes
_____ dans l'eau à 10° 76 _____

Avant que la vitesse soit devenue
0^m08 à 200 mètres du plan de séparation
et 0,0005 à 400 _____

il s'écoulera dans l'air à 10° 60 ans
_____ l'eau à 10° 242 ans

Concluons, comme pour la diffusion, que le frottement interne de l'eau ou de l'air, en mouvement tranquille, est tout-à-fait insuffisant pour expliquer la rapidité avec laquelle se font quelquefois les changements d'intensité ou de sens des courants. D'autres causes interviennent nécessairement.

En revanche, la petitesse de ce frottement permet la juxtaposition pendant des jours et des semaines de courants différents et même inverses, presque aussi indépendants que si le frottement était rigoureusement nul, tant qu'ils sont nuls. La couche de séparation dans laquelle se fait sentir l'influence du frottement n'atteint pas quelques mètres.

Théorie cinétique du frottement des gaz et des liquides. - Dans la théorie cinétique des gaz, quand un petit volume a un mouvement d'ensemble, les vitesses des molécules ne sont plus uniformément distribuées en tous sens; les molécules qui se meuvent dans la

direction du mouvement d'ensemble, ou à peu près, ont des vitesses plus grandes que celles qui sont en sens inverse. Si deux couches voisines se meuvent avec des vitesses différentes, elles échangent des molécules dont les vitesses ne sont pas les mêmes, et cet échange avec les chocs qui l'accompagnent diminue la vitesse de la couche la plus rapide, augmente au contraire la vitesse de la couche la plus lente, et équivaut par conséquent à un frottement entre les deux couches. Ce frottement est d'autant plus intense que les molécules d'une couche pénètrent plus vite et plus profondément dans l'autre couche avant d'y éprouver le premier choc, et on devine comment la grandeur mesurée du frottement permet de se faire une idée du chemin de libre parcours entre deux chocs.

M^r Caix a fort heureusement comparé cet échange de molécules, à l'échange de voyageurs, ou de marchandises qui peut se faire entre deux trains parcourant des voies parallèles avec des vitesses inégales, ou entre un train et le quai d'une gare. Chaque voyageur qui passe tranquillement d'un train lent dans un autre rapide, apporte avec lui sa vitesse, et ralentit tout le train, jusqu'à ce que la puissance développée par la locomotive lui ait rendu l'excès de vitesse nécessaire. Un échange du même nombre de voyageurs, qui laisse la masse de chaque train invariable, agit comme un frottement proportionnel à la différence des vitesses.

Propagation des petites déformations.

8^{ème} Leçon.

Le mode de propagation des petites déformations dans un milieu matériel quelconque résulte de la loi fondamentale de la dynamique et des propriétés statiques du milieu, qui nous font connaître quelles forces intérieures, quelles actions élastiques correspondent à la déformation qui se propage. La mise en équations du problème est facile, et l'intégration de ces équations différentielles est possible dans un grand nombre de cas, sous la condition que les déformations restent extrêmement petites. La comparaison des résultats de ce calcul avec ceux de l'expérience ne peut manquer d'être instructive, comme nous le verrons à propos de la vitesse du son dans l'air. - Les vibrations auxquelles sont dues les sensations sonores se propagent par l'intermédiaire des milieux matériels ordinaires, gaz, liquides ou solides. - Expériences: Ballon vide avec grelots - Diapason appuyé sur une table, - sur la tige d'un support en bois à large plateau tenu en l'air. - Diapason plongé dans l'eau d'un verre qui repose sur la caisse de résonance.

Il y a propagation de mouvement et de forces sans transport de matière. Un battement de mains est entendu à travers un rideau de fumée et agite la flamme d'une bougie sans que le rideau de fumée soit détruit. Les vagues courent à la surface de l'eau et font monter ou descendre les brins d'herbe, feuille ou branche

qui flottent à sa surface, mais sans les entraîner.

Lorsque la propagation du mouvement accompagne le début d'un mouvement d'un transport de matière il n'y a aucune relation nécessaire entre le sens de propagation, et la direction du mouvement. Le mouvement de transport peut se produire dans un sens et se propager en sens directement opposé. - Exemple du train de marchandise qui démarre. - Cette remarque a une grande importance; certains mouvements atmosphériques peuvent avoir leur source aux grandes hauteurs, et se propager de haut en bas, bien que le mouvement de transport soit établi de bas en haut. - Un exemple simple est fourni par l'emploi d'un bec de gaz placé en haut d'un tuyau de cheminée pour activer le tirage.

Le déplacement qui se propage peut même être perpendiculaire à la direction de propagation. - Rides à la surface de l'eau. - Déplacement transversal d'une corde.

Vitesse de Propagation.

La propagation d'un choc transversal le long d'une corde de section uniforme, uniformément tendue, se fait avec une vitesse constante, et la déformation produite semble courir sans se modifier tout le long de la corde. La vitesse de propagation est d'autant plus grande que la corde est plus tendue. Si la corde est accrochée à un clou fixe, le point d'attache reste immobile; au moment où le choc y arrive, le clou exerce une réaction, qui équivaut à un choc provoquant à chaque instant une déformation égale et contraire à celle qui arrive, - puisque la somme des deux laisse le clou immobile - on voit en effet une déformation vers le haut revenir vers l'opérateur, si celui avait frappé vers le bas. -

P , poids total qui tend la corde, en kilogrammes -

d , poids d'un mètre cube de la matière de la corde, en kilogrammes

S section droite de la corde en mètres carrés.

Il résulte des observations du Père Mersenne que la vitesse de propagation V d'une déformation transversale est en mètres par seconde

$$V = \sqrt{\frac{g P}{S d}} = \sqrt{\left(\frac{P}{S}\right) \cdot \frac{1}{\frac{d}{g}}}$$

g , accélération de la pesanteur $9,80$.

$\left(\frac{P}{S}\right)$ représente la tension par unité de surface ou plus généralement l'élasticité du milieu.

$\left(\frac{d}{g}\right)$ représente la masse spécifique, ou la densité mécanique de la matière. C'est une relation générale, due à Newton, la vitesse de propagation est proportionnelle à la racine carrée de l'élasticité du milieu, et en raison inverse de la racine carrée de sa densité mécanique.

Vibrations propres des cordes... Un choc produit à un bout d'une corde de longueur L (en mètres) arrive au clou qui la fixe au bout d'un temps T (en secondes) égal à $\frac{L}{V}$; il y change de sens, et le choc se réfléchit pour arriver à la main de l'observateur au bout du temps $\frac{2L}{V}$. Là un nouveau changement de sens accompagne une nouvelle réflexion; à ce moment même produisons un choc identique au premier, il s'ajoute à celui qui est revenu, et double la déformation. Un temps $\frac{2L}{V}$ après, un troisième choc triplera la déformation première, au bout d'un assez grand nombre de chocs, la déformation ainsi accumulée sera devenue très grande. Abandonnons la corde à elle-même, en tenant la main bien immobile, les vibrations de la corde continueront pendant très longtemps d'elles-

mêmes. - Expérience.

Au lieu d'attendre le temps $\frac{2L}{V}$ pour produire le second choc, frappons toujours dans le même sens, au bout du temps $\frac{L}{V}$, alors que le premier choc arrive au clou d'attache. - le premier choc, changé de signe par réflexion, et le second choc se rencontrent au milieu de la corde et le laissent immobile, puisqu'ils sont égaux et contraires. Continuons ainsi à des intervalles de temps $\frac{L}{V}$; les chocs de rang pair ajoutent leurs effets, et bientôt la corde vibre avec une grande amplitude, mais le milieu est immobile, et les deux moitiés se déplacent en sens inverse.

La période du mouvement, intervalle entre deux chocs consécutifs est $\frac{L}{V}$ moitié de la précédente, et le nombre de vibrations par seconde $\frac{V}{L}$, double.

On obtiendra de même deux points immobiles au tiers et aux deux tiers de la corde en produisant les chocs à des intervalles de $\frac{2L}{3V}$ secondes, et en général on aura un mouvement propre de la corde toutes les fois que le 2^e choc se produit exactement au moment où le 1^{er} arrive à la main; ce mouvement dont la période est $\frac{1}{n} \frac{2L}{V}$ donne n subdivisions de la corde par $n-1$ noeuds intermédiaires. Une fois bien mise en vibrations, la corde peut être abandonnée à elle-même, les deux bouts bien fixés; elle continue à vibrer très longtemps avec la même période.

Ces modes de vibration propres de la corde sont distincts les uns des autres, et forment une suite discontinue. On peut à la vérité donner artificiellement à la corde un mouvement périodique de période quelconque, mais il n'acquiert pas d'intensité, reste confus, et après

que la force périodique a cessé son action, le mouvement change rapidement de type et se résout en une superposition des différents modes propres à la corde. - C'est là une propriété générale des corps vibrants.

Tous les corps, quelle que soit leur forme, peuvent vibrer librement soit dans leur ensemble, sans aucun point immobile, soit en se subdivisant en volumes séparés par des surfaces immobiles ou nodales en plus ou moins grand nombre. En général la relation entre le rang de la vibration étudiée, (défini par le nombre et la disposition des surfaces nodales) est d'autant plus compliquée que la forme des corps est moins simple. - Ces corps ne sont pas susceptibles d'être employés comme instruments de musique, quand on les met en vibrations sans précautions, plusieurs de leurs sons propres se produisent à la fois, et l'on n'entend qu'un bruit confus et désagréable.

Les corps qui peuvent donner des sons musicaux sont ceux dont les nombres de vibrations obéissent aux mêmes lois que pour les cordes, et qui donnent successivement comme sons propres, (2) l'octave du son fondamental, (3) la quinte de l'octave, (4) la double octave, (5) la tierce majeure de la double octave, etc, ou une partie de ces tons.

Le point mis en mouvement par la main est un nœud, et non pas un ventre comme on pourrait s'en imaginer d'abord. - C'est que pour transmettre un mouvement intense à la corde il faut que la main ait un effort périodique intense à effectuer, par conséquent que la corde résiste énergiquement au mouvement de la main; et bien évidemment le point de la corde où les réactions

périodiques sont les plus intenses, est celui qui est le moins libre, c'est-à-dire le point immobile, le nœud.
 - C'est une règle générale : Quand un des modes de vibration propres à un corps est excité par une cause périodique quelconque, le mouvement se distribue dans le corps de telle sorte que le point d'application de la cause, soit un point de maximum de résistance à l'action de cette cause.

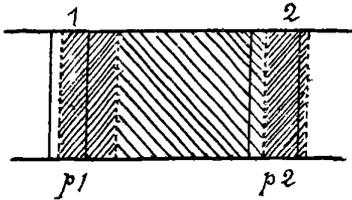
Propagation des vibrations dans l'air. - Onde produite par une explosion. - Mesure de la vitesse de propagation. - Pour une mesure grossière en pleine campagne, on peut employer comme chronomètre un pendule formé par une balle de plomb suspendue à un fil à coudre de 98 centimètres de longueur environ attaché à un support solide - on l'abandonne au moment où on voit la lueur du coup de pistolet, et on compte le nombre d'oscillations jusqu'au moment où on entend le bruit.
 - Désaccord entre les premiers résultats observés et la théorie de Newton. - Recherches précises de Regnault, et de M^r Violle sur la propagation du son par ondes planes dans de longs tuyaux cylindriques. - Résultats : dans l'air sec, quelle que soit la pression, la vitesse en mètres par seconde est

$$331 \sqrt{1 + \frac{t}{274}}$$

avec une erreur possible inférieure à un décimètre.

Cette vitesse ne dépend que de la température de l'air ; elle serait uniforme de bas en haut dans l'atmosphère sèche malgré la très rapide diminution de pression, si la température était indépendante de l'altitude.

théorie de la propagation par ondes planes dans un long tuyau cylindrique, on cherche d'abord comment varie la distance de deux plans voisins, assujettis à limiter constamment la même masse du gaz; la variation de cette distance fait connaître la variation de volume de la masse, puisque la section droite reste constante, et en appliquant une loi de compressibilité convenable, permet de calculer l'excès de pression sur la pression moyenne p dans la partie du gaz contenue entre ces deux plans. Dans une autre partie du gaz située à quelque distance de la précédente, la pression p^2 au même moment n'est pas la même. C'est sous l'influence de la différence de ces deux pressions $p_1 - p_2$ que se meut toute la masse intermédiaire.



Traits pleins; positions d'équilibre des quatre plans qui limitent la première tranche d'air 1, la deuxième tranche d'air 2, et la partie intermédiaire. Les traits en tirets indiquent les positions à une même époque quelconque.

Le seul point délicat du calcul est le choix de la loi de compressibilité. Newton, employant la loi de Mariotte, récemment découverte, trouva une vitesse trop faible d'un cinquième et jusqu'à Laplace la cause de ce désaccord resta inconnue. - Cette cause, la voici: la loi de Mariotte suppose que la température reste constante pendant le changement de volume, et par conséquent que le gaz reçoit ou cède de la chaleur; mais l'état d'un gaz très rapidement comprimé ou dilaté, est tout différent, nous le savons par l'expérience du briquet à air ou par l'expérience de Clément et Desormes. Quand la variation de volume est très rapide, elle n'est accompagnée d'aucun échange

de chaleur, et la petite variation de pression correspondante se déduit, comme on l'a fait pour l'expérience de Clément et Desormes (p) par l'équation.

$$p - p_0 = \frac{c_p}{c_v} \frac{p_0}{v_0} (v - v_0)$$

p_0, v_0 pression et volume spécifique du gaz en repos.

p, v pression et volume du gaz en vibration

c_p, c_v chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant.

Cette équation diffère de celle que donne la loi de Mariotte par la présence du facteur $\frac{c_p}{c_v}$, et comme la vitesse du son dépend de la racine carrée de l'élasticité du milieu, il faut multiplier le nombre de Newton par $\sqrt{\frac{c_p}{c_v}}$, pour avoir celui que donne la théorie de Laplace, c'est-à-dire par $\sqrt{1,4}$ ou 1,18. Et cette multiplication fait justement trouver la valeur donnée par l'expérience.

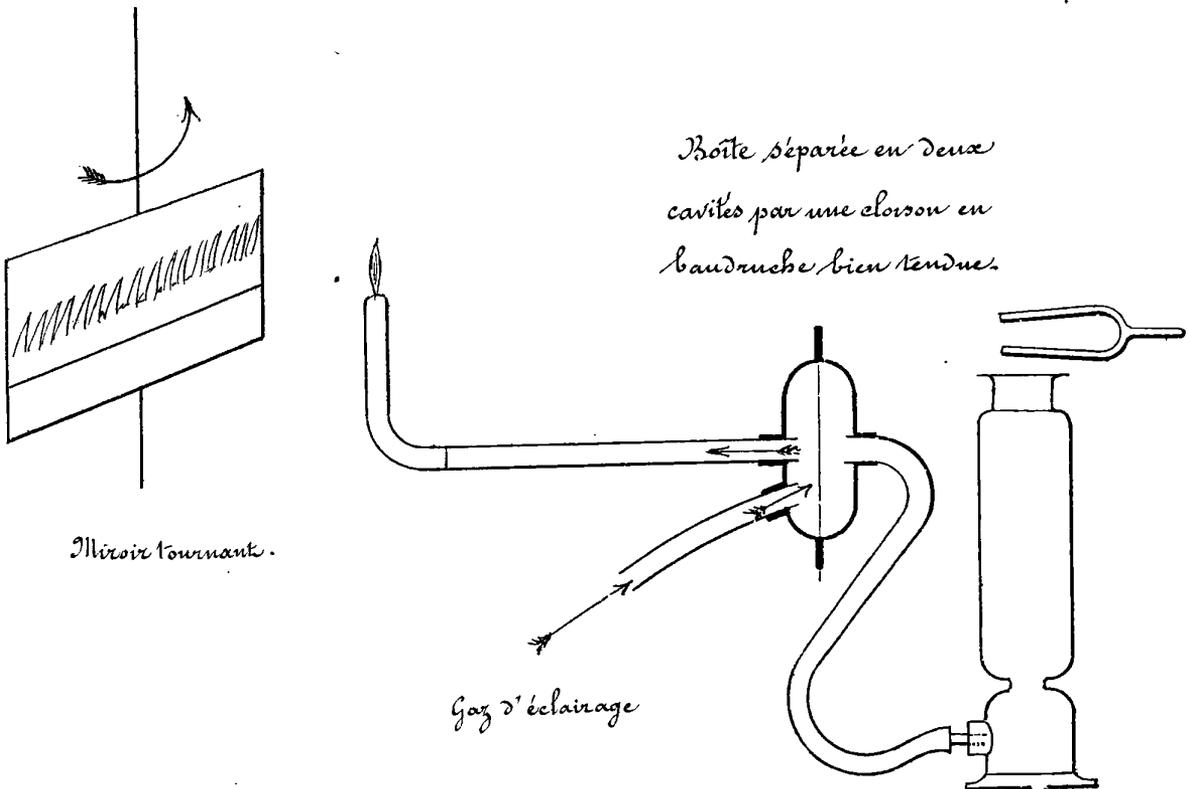
Ainsi la mesure de la vitesse du son équivalent à la répétition en grand, de l'expérience de Clément et Desormes, à l'abri de l'influence perturbatrice des parois, c'est cette mesure qui donne avec le plus de précision le rapport des chaleurs spécifiques de l'air, et par conséquent ce nombre si important dans toute la physique générale, l'équivalent mécanique de la chaleur (p. . .) C'est la raison pour laquelle les physiciens se sont attachés à déterminer avec tant de soin la vitesse du son dans l'air.

La valeur obtenue par M^r Violle conduit au nombre 428 pour l'équivalent mécanique de la chaleur, nombre très voisin de celui que nous avons adopté 430, comme intermédiaire entre les deux fournis par des méthodes différentes.

Tuyaux sonores. - Résonance.

L'existence d'une vitesse uniforme de propagation a les mêmes conséquences pour les vibrations de l'air dans un tuyau cylindrique, que pour les vibrations d'une corde. - Harmoniques. - Eprouvette renforçant le son d'un diapason. Toutes les fois qu'un des sons propres d'un corps (corde, tuyau, sonore, etc) a même période qu'une source sonore donnée (diapason, cloche, flûte, tambour, etc), le corps se met à vibrer énergiquement sous l'influence de la source; il résonne et renforce le son de celle-ci.

La résonance se produit par l'air renfermé dans un vase de forme quelconque, bouteille, carafe, flacon à deux ou trois tubulures, etc., sous la seule condition que



la période de la source soit égale au temps qu'une compression met à voyager de l'ouverture du flacon aux parois et à revenir exactement à l'ouverture. On résorve

spécialement le nom de résonateurs, aux vases de forme compliquée, dans lesquels le 1^{er} son après le son fondamental, est bien plus aigu que l'octave, et tout à fait en désaccord, ce qui rend toute confusion impossible et permet d'employer ces résonateurs comme s'ils n'étaient capables de renforcer qu'un seul son. - Application à l'analyse d'un son complexe. - d'une voyelle - (Helmholtz).

Emploi simultané du résonateur et de la capsule manométrique de Kœnig, avec miroir tournant (fig. ci-dessus).

9^{ème} Leçon.

Récapitulation des idées acquises sur la constitution des corps, et sur la nature de la chaleur.

Les propriétés des gaz et des liquides - (Diffusion et frottement interne) nous ont conduit à les regarder comme formés de molécules qui se meuvent très rapidement à peu près en ligne droite, mais se dévient les unes les autres quand elles passent à petite distance. Comme elles s'attirent suivant la loi de la gravitation universelle à grande distance, et qu'après s'être beaucoup rapprochées elles se séparent, il est naturel d'admettre qu'elles se repoussent à petite distance; si elles étaient en repos, ou animées de faibles vitesses, deux molécules se trouveraient à une certaine distance l'une de l'autre en équilibre stable, en un point où la force est nulle, et devient, attractive pour une distance un peu plus grande, répulsive pour une distance moindre. Agglomérées en grand nombre, ces

molécules pourront former un corps solide de dimension et de forme quelconque, même dans le vide. - Ce solide sera déformable et élastique : L'action d'une pression extérieure uniforme par exemple pourra être équilibrée par les forces répulsives lorsque les molécules seront rapprochées par la compression. Une molécule d'un corps composé est constituée par des atomes différents; elle a une forme et une certaine symétrie. Les positions d'équilibre d'une deuxième molécule identique ne sont pas définies seulement par la distance mutuelle, mais encore par la symétrie de la molécule. Il y a, non pas une sphère d'équilibre stable mais des points isolés distribués d'une certaine manière symétrique par rapport à la molécule; quand le dépôt, au sein d'une solution, commence à se produire, les premières molécules se disposent en ces points, autour de l'une d'elles; elles s'orientent parallèlement, et la symétrie de la molécule doit se retrouver au moins en partie dans la symétrie de distribution des molécules - les unes par rapport aux autres; le dépôt sera cristallisé.

Comparaison avec les positions d'équilibre d'une bille sur un sol formé d'un seul pic conique au milieu d'un entonnoir très évasé; ou de deux pics voisins séparés par un col, au milieu d'un entonnoir analogue, ce qui donne deux dépressions symétriques, dans une direction perpendiculaire à la ligne de faite, etc.

La théorie critique a conduit à regarder la température comme proportionnelle à la force vive des

molécules individuelles. D'autre part, le principe de l'équivalence nous apprend qu'une quantité de chaleur équivaut à une certaine quantité de travail ou de force vive. Nous voici amenés à admettre que même dans un solide les molécules ne sont pas en repos, mais sont animées d'un perpétuel mouvement d'agitation plus ou moins régulier autour de leur position d'équilibre, et que la force vive totale de ce mouvement d'agitation de la molécule et de ses atomes, est ce que nous sentons comme chaleur. L'approximation de la loi de Dulong et Petit sur les chaleurs spécifiques des solides se comprend si la chaleur fournie au corps est employée principalement à augmenter l'agitation des atomes dans la molécule, et pour une faible part seulement à l'accroissement du mouvement de la molécule prise en totalité et au travail de dilatation.

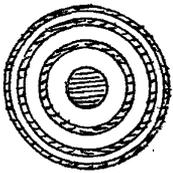
Ce mouvement d'oscillation des atomes et des molécules nous allons le retrouver par une autre voie plus directe, et plus précise, en étudiant la lumière émise par des corps chauffés.

La Sensation lumineuse est due à un phénomène périodique. A chaque période correspond une sensation colorée distincte.

Cette périodicité, découverte par Newton, mais interprétée d'une manière compliquée dans la théorie de l'émission, a été confirmée par Young et Fresnel, et s'est montrée d'une importance capitale pour l'interprétation de tous les phénomènes lumineux.

blanche - verre rouge, les anneaux sont larges - verre bleu, ils sont beaucoup plus petits.

On voit ces anneaux lorsqu'on regarde la lumière réfléchie autour du point de contact d'un plan de verre, et d'une lentille convexe de très grand rayon. - Au lieu de la lumière on voit autour du point de contact une tache noire, puis un anneau brillant, un anneau sombre, un autre anneau brillant, entouré d'un autre anneau sombre, etc. - les anneaux se resserrent de plus en plus; ils sont colorés et de plus en plus pâles dans la lumière blanche; à mesure qu'on s'éloigne du centre. - Dans une lumière d'une seule couleur (rouge ou bleue, etc.) ils sont alternativement sombres et brillants, et plus nombreux.



Newton a reconnu que la forme et la grandeur de ces anneaux ne dépendent que des deux surfaces l'une plane, l'autre convexe, qui se touchent, par des mesures de diamètre et par un calcul géométrique fort simple, il a reconnu que la distance des deux surfaces au point où se forme le n^{e} anneau sombre est n fois la distance des surfaces au point où se forme le premier anneau sombre. - Cette distribution périodique, qui rappelle la distribution des nœuds dans une corde à partir de son point d'attache au mur ou dans un tuyau sonore cylindrique à partir du fond, conduit à l'explication du phénomène; deux réflexions se produisent l'une à la première, l'autre à la seconde surface, et avec des intensités à peu près égales; si la lumière est un phénomène de vibration périodique, on observera sur le

rayon réfléchi un phénomène de vibrations stationnaires du à la superposition des deux vibrations réfléchies, quand l'une d'elles est en retard d'une demi-longueur d'onde sur l'autre, (ou d'un nombre impair de demi-longueurs d'onde). Chacune des deux ondes réfléchies, si elle était seule, produirait au même instant des déplacements égaux mais opposés d'un même point quelconque. Superposées, elles se compenseront absolument et laisseront en repos tous les points du rayon réfléchi. Quand au contraire le retard est d'une longueur d'onde tout entière, les mouvements réfléchis seront d'accord et l'amplitude doublée. - L'œil sensible à la force vive moyenne de la vibration n'éprouvera aucune sensation - (obscurité) - là où les deux vibrations réfléchies se compensent; il verra au contraire une lumière intense, là où les deux vibrations s'ajoutent.

Comparaison avec une longue corde accrochée à un mur, et maintenue peu mobile par un chevalet en caoutchouc à quelque distance du mur.

Sans étudier plus à fond l'expérience de Newton, sur laquelle nous reviendrons dans les leçons d'optique de la fin de ce cours, retenons - en que la sensation lumineuse est due à un phénomène vibratoire, dont la longueur dans le vide est, pour l'extrême rouge $0^{\text{mm}}0065$
 pour le jaune 0. 00059
 pour l'extrême violet 0. 00035

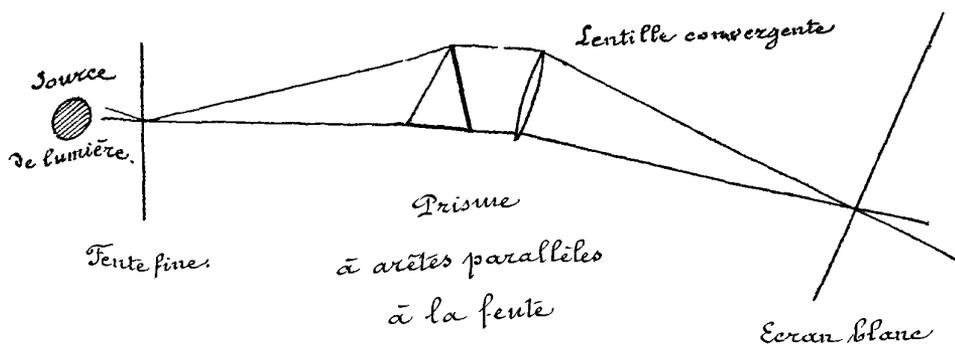
La lumière se propage dans le vide, c'est-à-dire dans les espaces stellaires, dans le vide de nos meilleures machines pneumatiques, du baromètre, etc. - Cet espace n'est donc pas vide de toute matière,

mais seulement de matière solide, liquide ou gazeuse.

La matière qui reste, que nous ne savons pas enlever, ni condenser, dont nous ne savons pas étudier les propriétés statiques, faute de savoir l'isoler, nous l'appelons éther - elle est élastique et inerte, au sens mécanique, c'est-à-dire douée de masse; toutefois, l'uniformité de vitesse de la lumière dans les espaces planétaires, semble indiquer que l'éther y est distribué uniformément, et que par conséquent il n'est pas soumis à la gravitation universelle; c'est ce qu'on veut dire quand on l'appelle impondérable. L'existence de cette matière n'est pas plus hypothétique que ne l'était l'existence des gaz au commencement du 17.^e siècle, alors qu'ils n'étaient connus que par leurs mouvements, les vents, les ondulations sonores, etc. mais non pour leurs propriétés statiques, puisqu'on ne savait pas encore les isoler.

L'émission de lumière par un corps chauffé se présente maintenant comme analogue à l'émission du son par une cloche. Les atomes et les molécules du corps se mettent à vibrer d'autant plus énergiquement qu'on les chauffe davantage, elles communiquent leurs vibrations à l'éther (comme la cloche à l'air) et celui les transmet en tous sens avec la vitesse de la lumière; quand elles arrivent sur un autre corps, elles l'éclairent et l'échauffent, le rendent visible par diffusion, s'y réfléchissent ou s'y réfractent, sont plus ou moins énergiquement absorbées. Ce sont toutes ces propriétés des radiations que nous allons étudier.

Production d'un spectre pur



On met l'écran au point en éclairant la fente par une flamme d'alcool salé, et cherchant à obtenir une image jaune aussi fine que possible de la fente. On remplace ensuite la flamme d'alcool par la source que l'on veut étudier.

Les vapeurs métalliques donnent un spectre de raies, fines et nombreuses; ce spectre est le même de quelque façon qu'on chauffe la vapeur métallique: sel dans une flamme (Chlorure, phosphate, carbonate, etc); étincelle électrique entre deux bâtons du métal. — (Kirchhoff-Bunsen).

Les liquides ou les solides donnent un spectre continu, au dessous de 500° , ils sont invisibles, mais émettent de la chaleur; vers 500° apparaît une lueur rouge sombre, et quand on élève la température, on voit paraître successivement le rouge, le jaune, le vert et enfin le bleu; à l'œil nu, la lumière émise paraît de plus en plus blanche. (Argent fondu, platine fondu, fonte de fer, etc).

Le Soleil émet un spectre qui paraît continu, s'il n'est pas très pur, mais dans lequel on distingue quand tout est bien réglé, un nombre très grand de raies sombres. Observées d'abord par Fraunhofer, qui s'assura qu'elles occupaient une position fixe dans le spectre en mesurant

à diverses époques l'indice de réfraction de son prisme pour ces raies, on n'en a compris l'origine qu'à la suite des travaux de Kirchhoff et Bunsen. Foucault avait déjà reconnu sur la raie du sodium la propriété suivante qui est générale : Quand on interpose entre une source blanche (arc électrique) et la fente une grande épaisseur de flamme d'alcool salé, on aperçoit dans le spectre continu une interruption par une raie sombre dans le jaune, et si la fente est assez haute, pour que ses extrémités ne soient éclairées que par la flamme de l'alcool salé, on voit au-dessus du spectre la raie jaune lumineuse du sodium, exactement sur le prolongement de la raie sombre.

Renversement des raies. — Une vapeur qui émet des rayons d'une certaine couleur, absorbe énergiquement ces mêmes rayons, et dans des conditions convenables cette absorption peut l'emporter sur l'émission et produire dans le spectre continu d'un solide très chaud une ligne sombre. — Cette réciprocity complète de l'absorption et de l'émission est générale.

Spectre infra-rouge. — Le maximum de chaleur est dans une direction moins déviée que le rouge, et qui correspond à une longueur d'onde plus grande. Le maximum s'avance vers le rouge à mesure que la température de la source s'élève. On trouve une plus forte proportion de chaleur dans le spectre de l'arc électrique que dans le spectre solaire, et le maximum est plus éloigné du rouge, pourvu qu'on évite toutes les causes d'absorption, en

employant des prismes et lentilles de sel gemme au lieu de verre. — C'est la vapeur d'eau de l'atmosphère qui coupe le bout du spectre clair. Celui-ci paraît d'autant plus étendu que l'épaisseur atmosphérique traversée est moindre, en observant à midi, et se plaçant au sommet d'une haute montagne.

Spectre ultra violet. — Vers l'extrémité violette du spectre et au delà, se produisent les phénomènes de phosphorescence et de fluorescence sur les sels d'argent d'où dérive la photographie.

Les caractères des spectres des solides, liquides et gaz sont conservés en dehors des limites visibles; en particulier le spectre ultra violet étudié photographiquement montre très bien le renversement des raies.

Radiations. — Dans l'étendue du spectre visible, quelle que soit la modification qu'on imprime à une couleur quelconque, la chaleur et l'action chimique qu'on peut observer au même point du spectre subissent la même modification, dans la même proportion; ce n'est donc point par hasard que ces propriétés se trouvent réunies; ce ne sont que des effets distincts parce que l'instrument d'observation est distinct; d'une seule et même propriété du rayon lumineux coloré, de même que l'intensité du son entendu, l'amplitude de l'excursion d'une membrane mince, la grandeur des dentelures d'une flamme de König ne sont que des manifestations différentes d'une seule et unique propriété des vibrations émises dans l'air par un diapason. Quand on veut caractériser plus spécialement ce qu'émet la source lumineuse, sans spécifier l'instrument d'observation, on emploie au lieu des mots lumière, chaleur, action chimique, etc, le mot radiation.

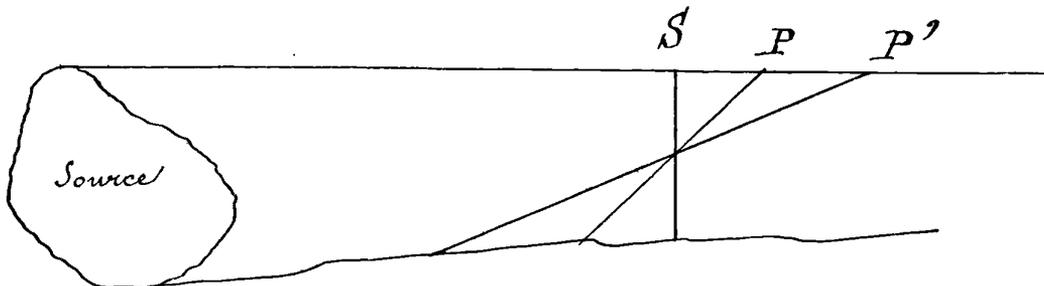
10^{ème} Leçon.

Programme. — Chaleur Rayonnante.

Passage à travers le vide. — Propagation rectiligne.
Réflexion régulière. — Miroirs plans. — Miroirs sphériques.

Pour une source et un thermomètre dont les dimensions sont très petites, par rapport à leur distance, la quantité de chaleur reçue est en raison inverse du carré de la distance.

La quantité de chaleur provenant d'une source éloignée, que reçoit une surface plane P déterminée dépend uniquement de l'étendue de la section droite S du faisceau limité au contour de la surface, quelle qu'en soit l'obliquité. — Il en est à peu près de même de la quantité



de chaleur envoyée dans une direction oblique quelconque, par une surface chaude (Lambert).

Emploi des miroirs conjugués de Leslie. — Thermomètre différentiel.

Pouvoir réflecteur régulier. — Métaux — Eau. —
Pouvoir diffusif. — Papier. — Difficulté des mesures

La quantité de chaleur absorbée par un corps opaque est alors connue par différence entre la quantité de chaleur

incidente et tout ce que l'on retrouve comme quantité réfléchie et diffusée. - Une mesure plus directe est fournie par l'étude de la vitesse de réchauffement du thermomètre dont une boule, exposée au rayonnement, est formée de la matière dont on veut connaître le pouvoir absorbant.

Thermomètre en verre nu — noirci — argenté — exposés au rayonnement d'une bouillotte noircie.

Réciprocité des pouvoirs émissifs et absorbants.

Les mêmes thermomètres rayonnant vers des mélanges réfrigérants à basse température; étude de la vitesse de refroidissement.

Étude du pouvoir émissif au moyen du cube de Leolic. - Les faces polies rayonnent très peu; les faces noire, blanchie au blanc de céruse, peinte avec une oxyde quelconque, rayonnent beaucoup et à peu près également à 100° - une face formée par une lame de verre à vitre, ou peinte au borate de plomb, rayonne à peine moins que le noir de fumée; de même une face humide. - En revanche une face recouverte d'iode ne rayonne presque pas.

Vérifions les conséquences de la réciprocité des pouvoirs émissifs et absorbants. - Le borate de plomb à 550° rayonne beaucoup moins que le noir de fumée; (Desains) il devient donc transparent; c'est en effet, la température de fusion, et il donne alors un verre transparent même pour la lumière. - Le verre ordinaire doit être opaque pour la chaleur, l'eau aussi. - L'iode au contraire, doit être transparent. - Concentrons les rayons d'un bâton de charbon rendu incandescent dans la flamme du chalumeau oxydrique, sur un thermomètre peu sensible, d'abord au moyen d'un petit ballon plein d'eau, qui donne une belle image lumineuse.

le thermomètre ne bouge pas - ensuite au moyen d'un ballon pareil rempli d'une solution opaque pour la lumière, d'iode dans le sulfure de carbone - le thermomètre s'échauffe très-vite - Importance de l'absorption de la chaleur obscure par l'eau, par le verre.

Les verres. - L'intérieur peut être peint au blanc de céruse, dont l'absorption et le rayonnement obscur sont les mêmes que pour le noir de fumée, et qui éclairent l'intérieur.

Absorption par les vapeurs. - Résultats de Tyndall. - On interpose sur le trajet d'un faisceau de chaleur une quantité déterminée de matière par unité de section du faisceau, soit à l'état liquide, soit à l'état de vapeur pure, soit à l'état de vapeur mélangée à l'air, la grandeur de l'absorption n'est pas la même, la vapeur absorbe moins que son liquide; mais le classement des diverses substances reste le même soit qu'on les prenne toutes à l'état liquide, soit qu'on les prenne toutes à l'état de vapeur. - La vapeur d'eau dont l'étude directe est extrêmement difficile doit donc se comporter à peu près comme l'eau et absorber énergiquement les radiations obscures. - L'air sec et sans poussières n'absorbe à peu près rien, la très faible quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère absorbe et émet 70 fois plus que l'air auquel elle est mêlée. - Les trois premiers mètres d'air humide absorbent au moins un dixième de la chaleur rayonnée par le sol.

Les corps très odorants absorbent plusieurs centaines et plusieurs milliers de fois plus que la vapeur d'eau elle-même.

Les gaz et les vapeurs absorbent énergiquement les radiations qu'ils émettent et celles-là seules. La vapeur d'eau laisse passer la totalité de la chaleur rayonnée par la flamme de l'oxyde de carbone brûlant dans l'oxygène,

et absorbe fortement la chaleur émise par la flamme de l'hydrogène brûlant dans l'oxygène ; c'est l'inverse pour l'acide carbonique (Cyndall).

Changement progressif de composition du faisceau transmis à mesure que l'épaisseur traversée augmente. - La couleur d'une dissolution devient de plus en plus simple et pure à mesure que l'épaisseur ou la concentration augmentent. Certaines couleurs fortement absorbées disparaissent du spectre transmis après quelques millimètres de parcours, d'autres après quelques centimètres, et il ne reste bientôt plus que les couleurs qui passent à peu près librement et pour lesquelles l'absorption est très faible. Il en est de même pour la chaleur rayonnante. Le faisceau incident se simplifie, perd dès le début tout ce qui est absorbable et devient de plus en plus transmissible.

Verre. - Eau.

Une cuve d'eau de 5^{cm} d'épaisseur à parois de verre mince, laisse passer

0,58 de la chaleur solaire totale.

0,14 _____ obscure prise dans le spectre (prisme de sel gemme) à une distance égale à celle du rouge ouvert.

0,00 de celle prise à distance double.

0,92 de la chaleur solaire totale préalablement tamisée à travers une épaisseur de 25^{cm} d'eau.

0,02 de la chaleur émise par une flamme d'alcool salé.

Les différences de transparence pour les diverses radiations sont nettes sur le tableau suivant :

Fraction transmise par des Lames de 2,6 millimètres.

	Flamme de lampe	Platine chauffé	Cuire noir	Cuire noir
	à huile.	au blanc.	à 400°	à 100°
Sel Gemme.	0,92	0,92	0,92	0,92
Verre	0,39	0,24	0,06	0,00
Gypse	0,14	0,05	0,00	0,00
Glace (eau gelée)	0,06	0,00	0,00	0,00

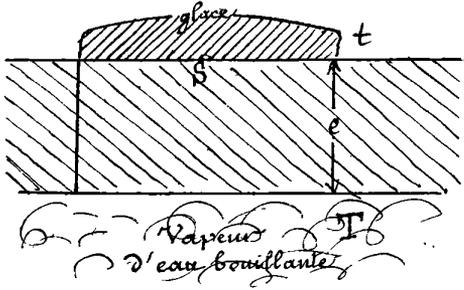
11^{ème} Leçon

Programme. - Conductibilité.

Faits d'observation journalière. - Différences de conductibilité des métaux, du bois, du verre. - (Eisonnier, allumette, tube de verre travaillé à la lampe) - Dans une tige, qui présente une grande surface de refroidissement par l'air, l'élévation de température produite à une extrémité, se fait sentir inégalement à différentes distances. Chaque tranche de la tige dont la température est supérieure à la température de l'air, perd de la chaleur par rayonnement; puis qu'elle s'est échauffée et se maintient chaude, c'est qu'elle reçoit de la chaleur par l'intérieur de la tige; ce mode de transmission de proche en proche par l'intérieur d'un corps opaque porte le nom de Conductibilité.

Inégale sensation de fraîcheur produite par le contact des corps pris en grande masse à la température ordinaire, sur la main ou les lèvres, qui sont plus chauds. -

Cas le plus simple. - Mur indéfini. -



On maintient les deux faces d'une large lame plane d'épaisseur uniforme, à deux températures différentes. Pour cela il faut lui fournir de la chaleur d'un côté, lui en enlever autant de l'autre

côté; par exemple en exposant une face à la vapeur d'eau bouillante, qui s'y condense et retombe dans la marmite, - et en posant sur l'autre face un morceau de glace qui fond, et dont on peut, avec quelques précautions, déterminer la perte de poids. Chaque centimètre carré de la surface froide donne passage à la même quantité de chaleur par seconde; la quantité reçue par le morceau de glace est donc proportionnelle à la surface de contact avec la plaque. La quantité qui passe est évidemment d'autant plus grande que la différence de température est plus grande et que la distance des faces est moindre. La quantité de chaleur transmise Q est proportionnelle à la durée de l'expérience \mathcal{C} à la surface utilisée S à la différence de température $T-t$ et en raison inverse de l'épaisseur e ;

$$Q = k \frac{S}{e} (T-t) \times \mathcal{C}$$

et le coefficient k , par lequel il faut multiplier toutes ces quantités pour passer de la proportionnalité à l'égalité s'appelle le coefficient de Conductibilité.

L'expérience décrite permettra de déterminer k en mesurant S , e , \mathcal{C} , $T-t = 100^\circ$, et se rappelant que la quantité de chaleur qui a fondu p kilogrammes de glace est

Tel est le principe de la théorie de la conductibilité fondée par Fourier au commencement de ce siècle et admirablement développée par lui-même. Une des conséquences les plus importantes est relative à l'état variable qui se produit soit à partir du moment où l'on commence à chauffer, soit lorsqu'on modifie périodiquement la température d'une des faces de la lame. Prenons la lame épaisse à 0° , et posons-la au dessus de la marmite d'eau bouillante la surface inférieure, se réchauffe très vite et de la chaleur commence à cheminer vers l'autre face; mais une partie s'arrête en route pour élever la température de la couche, qu'elle traverse, jusqu'au moment de la distribution permanente de température, décroissant proportionnellement à la distance de la couche, à la face chaude).

Comme cette distribution de température est indépendante de la nature du corps, la quantité de chaleur, qui doit s'accumuler dans une couche pour y produire une variation de température déterminée, est ainsi proportionnelle à la quantité de chaleur qu'exige un mètre cube du corps pour s'échauffer d'un degré, c'est-à-dire au produit de la masse d'un mètre cube du corps d par la chaleur spécifique c . Il en résulte que l'état variable dépend non pas de la quantité de chaleur que fournit la conductibilité à chaque couche, mais du rapport de cette quantité à celle que la couche retient pour se réchauffer, c'est-à-dire du rapport k/cd .

— Conductibilités. —

	k	k/cd
Cuivre pur	0, 099	0, 000 118
Fer	0, 020	0, 000 022 5
Glace (eau gelée)	0, 000 57	0, 000 000 8
Sous-sol (valeur moyenne)	0, 000 5	0, 000 001 0
Eau-liquide	0, 000 2	0, 000 000 2
Bois - Tissus - (valeur moyenne)	0, 000 01	
Verre	0, 000 2	0, 000 000 4
Hydrogène	0, 000 034	0, 000 12
Air, oxygène, azote oxyde de carbone	0, 000 005	0, 000 016

Unité de longueur, le mètre; de surface, le mètre carré,
de volume, le mètre cube.

Unité de temps, — la seconde.

Unité de masse, — la masse d'un kilogramme (un litre d'eau à 4°).

Unité de quantité de chaleur. La quantité nécessaire pour élever
d'un degré centigrade la température d'un Kilogr. d'eau.

N.B. Les métaux conduisent bien la chaleur; les roches compactes; les bois, la glace, le verre médiocrement; l'eau et la plupart des liquides, mal. (Exp. de M. Duclaux). Les gaz très mal, mais à cause de leur faible densité ils se placent à côté des métaux pour la faible durée de l'état variable, de rôle protecteur de la ouate, de la plume, de la paille, — matières déjà peu conductrices par elles-mêmes, — quand on a soin de ne pas les laisser, tiens surtout à la quantité d'air emprisonné.

La chaleur se répand par conductibilité, comme la matière par diffusion, ou le mouvement par frottement.

Si à un certain moment une masse indéfinie immobile d'un corps, est à la température de 100° d'un côté d'un plan et à la température de 0° de l'autre côté, la distribution des températures y , au bout d'un temps est encore représentée par la courbe de la page 32. — La température devient tout de suite 50° dans le plan même de séparation initial, mais pour que du côté froid, la température devienne 8° à deux centimètres de là, et 0° à quatre centimètres, il faudra :

dans le cuivre	2, 2 secondes	et 7 ans
fer	5, 5	17,
air	6, 25	20,
sous-sol	100.	320,

pour que ces mêmes températures soient atteintes à 200 et 400 mètres de la surface de séparation.

Étant qu'il n'y a pas mélange direct, deux couches d'air contigues peuvent conserver des températures très différentes pendant des journées entières, sans que les échanges de chaleur par conductibilité pénètrent au delà de quelques décimètres d'épaisseur. C'est ce qui arrive dans l'atmosphère lorsque l'air calme, sec et froid des régions intérieures, est surmonté par un courant bien régulier d'air à peu près sec et chaud. (Observatoires de montagne, ascensions aéronautiques). La distribution des températures normale exige le mélange des couches d'air de différents niveaux.

Echauffement périodique de la surface d'un vase. Expérience avec un ballon de verre formant thermomètre à air et un brûleur Bunsen, qu'on

approche pendant une demi seconde environ, qu'on éloigne pendant la demi seconde suivante; etc.

L'air se contracte (se refroidit) au moment où l'on approche le brûleur, et au contraire se dilate (se réchauffe) au moment où on éloigne le brûleur. C'est que tout le gaz s'échauffe non pas au moment où on chauffe l'extérieur du ballon, mais au moment où l'intérieur s'échauffe, et que les variations de température ne se font sentir à l'intérieur qu'une demi seconde environ après qu'elles ont été produites à l'extérieur. Si l'épaisseur du verre était double, les dilatations de l'air paraîtraient coïncider avec l'approche du bec Bunsen; en réalité elles seraient en retard d'une seconde. - Une épaisseur triple donnerait un nouveau désaccord par retard d'une seconde et demie, etc.

D'autre part, l'écart entre les températures extrêmes, qui est de plus d'une centaine de degrés à l'extérieur est beaucoup moindre, un degré environ, à l'intérieur du ballon, et serait bien moindre encore dans un ballon plus épais, tout à fait insensible (avec la période d'une seconde), pour un ballon d'un centimètre d'épaisseur. Toute la chaleur qui s'enfonce vers les couches intérieures pendant l'approche de la flamme, revient en arrière et se perd par rayonnement lorsque la flamme est éloignée.

Températures souterraines. - La température croît avec la profondeur, à peu près uniformément, à raison de 1° par 30 mètres environ quelle que soit l'époque de l'année, au dessous de 11 mètres. - Difficulté des observations faites dans les puits artésiens - puits de mine - sources de

chaleur locales. - La terre perd donc constamment de la chaleur qu'elle rayonne vers les espaces célestes; environ 145 calories par mètre carré en un jour. - La surface reçoit, à la vérité chaque jour une partie des 1200 calories environ que le soleil verserait sur chaque mètre carré en l'absence de toute atmosphère; mais, comme dans l'expérience du ballon de verre cette chaleur ne pénètre que lentement dans le sol, et jusqu'à une faible profondeur, pour s'échapper pendant la nuit; en été il y a un petit excès de chaleur gagnée qui chaque jour s'enfonce plus avant, mais que le sol restitue peu à peu en hiver, lorsque la longueur des nuits rend la perte supérieure au gain. Les variations diurnes de température ne sont guère sensibles que jusqu'à 1 mètre de profondeur et les variations annuelles jusqu'à 15 ou 20 mètres au maximum. Ces variations subissent un retard proportionnel à la profondeur à laquelle on observe; ainsi à une profondeur de 7 à 8 mètres, c'est en Janvier que la température est plus élevée et en Juillet qu'elle est la plus basse. D'ailleurs, la variation de température dans ces couches superficielles n'a pas souvent la régularité que lui assigneraient les seules causes astronomiques. Un ciel couvert qui diminue le rayonnement nocturne, un vent sec qui active l'évaporation, la pluie, la neige, les infiltrations, sont autant de causes perturbatrices dont l'importance est de même ordre que celle des variations diurnes - l'évaporation d'un millimètre d'eau absorbe environ 600 calories par mètre carré. -

Au total, quelles que soient ces fluctuations

diurnes et annuelles, les pertes l'emportent sur les gains en tous les points de la terre; un globe d'eau recouvert d'une croûte de glace pourrait suivre le même raisonnement par mètre carré, par la congélation d'une épaisseur d'un demi mètre d'eau par an environ. Si l'on connaissait la température de fusion des principales roches, dans les conditions de pression de l'intérieur de la terre, on pourrait se faire une idée de l'épaisseur de la croûte solide. D'autre part, si on connaissait la chaleur de fusion de ces mêmes roches, on pourrait calculer à quelle augmentation annuelle d'épaisseur de la croûte - solidification d'une partie du noyau liquide - correspond la perte de chaleur par la surface. Enfin, la théorie de la propagation de la chaleur permettrait de calculer combien de temps a dû s'écouler depuis le commencement de la solidification jusqu'à l'époque actuelle. Si incomplète que soit notre connaissance des éléments de ce calcul, elle nous permet pourtant de fixer des limites extrêmes; d'après Sir William Thomson, il y a plus de 20 millions, mais moins de 400 millions d'années, que la croûte terrestre a commencé à se former.

Mais y a-t-il une croûte solide de faible épaisseur, enveloppant un globe liquide, ou au contraire, le globe est-il tout entier solide, ou au plus pâteux comme de la poix, mais non liquide comme de l'eau dans les régions centrales? Bien que non résolue, la question n'est pas inabordable. Deux phénomènes principaux dépendent de la différence des actions que le soleil et la lune exercent aux différents points de la

terre. Ce sont les marées et la précession des équinoxes.

Si la croûte terrestre n'avait qu'une épaisseur d'une centaine de kilomètres, les actions qui produisent les marées océaniques s'exerçant sur la masse liquide interne, cette croûte mince céderait sans se briser (comme l'enveloppe d'un ballon de caoutchouc sous la pression des doigts) et se gonflerait presque autant que l'océan lui-même. Si donc la terre était entièrement recouverte d'eau la déformation de la surface de l'eau et celle du bassin étant presque égales, la marée apparente serait à peu près inappréciable. Malheureusement les continents et les îles compliquent beaucoup les marées océaniques, et ce n'est que par l'étude de la marée semi-mensuelle dégagée de la marée diurne qu'on peut espérer un résultat. De bons juges trouvent prématurée la conclusion de Sir William Thomson, que la terre se comporte dans son ensemble comme un globe solide, plein, plus difficile à déformer qu'un globe égal d'acier trempé.

La terre fait chaque jour un tour autour de sa ligne des pôles laquelle est inclinée sur le plan de l'orbite que décrit le centre de la terre autour du soleil. Cet axe reste sensiblement parallèle à une direction fixe dans l'espace, dans le cours d'une année; pourtant l'observation de la position du soleil au milieu des étoiles, au jour et à l'heure de l'équinoxe de reconnaître, par comparaison avec d'anciennes observations (Arago, *Astronomie populaire*, I. p. 263). — que l'intersection du plan de l'équateur terrestre avec le plan de l'orbite de la terre n'a pas une

direction fixe par rapport aux étoiles (précession des équinoxes) et que par conséquent la ligne des pôles tourne lentement autour de la perpendiculaire à l'orbite terrestre. Ce mouvement lent est attribué depuis Newton à la forme aplatie du globe, et aux attractions qui s'exercent sur le renflement équatorial; et les calculs, faits en supposant la terre entière absolument indéformable, conduisent à la valeur observée de la précession en partant de la connaissance géodésique de l'aplatissement. Or, il semble que le résultat devrait être différent si la terre est sensiblement déformable et surtout si une partie est liquide. Ici encore les essais de théorie reposent sur des données trop incertaines pour permettre une conclusion. Mais on ne peut guère douter qu'avant peu d'années, les progrès accomplis dans l'observation des marées, et surtout dans la manière de les analyser ne conduisent à une réponse formelle.

Applications de la théorie du rayonnement.
Rôle de la vapeur d'eau. - Rosée. - Expériences et théorie
du Dr Wells. -

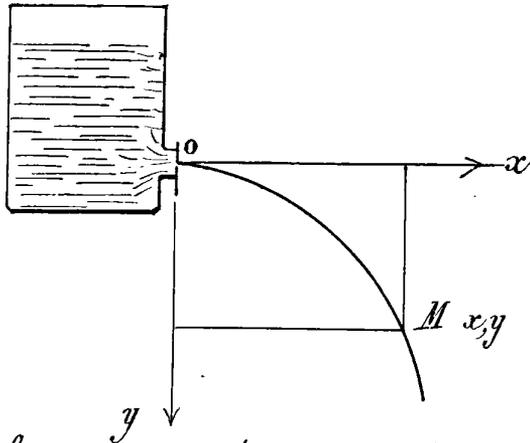
12^{ème} et 13^{ème} Leçons.⁽¹⁾

Mouvements permanents généraux des liquides.

Les premières expériences scientifiques sur l'écoulement permanent des liquides sont celles de Torricelli (1641). Un liquide contenu dans un vase large s'écoule par un petit orifice percé dans une plaque métallique très mince de manière à éviter complètement les frottements. Le liquide qui forme le jet, se meut sous l'influence de la pesanteur seule, la pression dans l'eau du jet étant la même que dans l'air environnant, uniforme par conséquent. Chaque petit volume qui sort décrit une parabole comme ferait une balle lancée horizontalement avec la même vitesse; et le jet qui, à un instant donné, représente l'ensemble des positions successives d'une même masse, a précisément cette forme parabolique. Il est facile de mesurer les dimensions de cette parabole et d'en déduire la vitesse du liquide à sa sortie du vase, par les formules qui concernent au mouvement des projectiles.

La vitesse v dépend de la hauteur du liquide au-dessus de l'orifice, et de l'excès de la pression exercée sur la surface libre sur la pression de l'atmosphère dans laquelle l'eau jaillit. Soit H la somme de cette

(1) Avec des compléments empruntés à quelques-unes des Leçons de Météorologie, et à titre de renseignements, quelques démonstrations mécaniques en note.



Eq. de la parabole, en fonction du temps t , et de la vitesse horizontale initiale v :

$$x = vt, \quad y = \frac{1}{2} gt^2$$

$$y = \frac{g}{2v^2} x^2, \quad v^2 = \frac{g}{2} \frac{x^2}{y}$$

hauteur et de cet excès, évalué en hauteur du liquide qui coule. Torricelli a trouvé que l'on a

$$v = \sqrt{2gH}$$

H en mètres,

v en mètres par seconde

g , accélération de la pesanteur en mêmes unités, $g, 81$

La vérification exige que le diamètre du jet soit assez gros, un centimètre par exemple. Dans ce cas, en lançant le jet verticalement vers le haut, on constate, comme l'indique l'expression de la vitesse initiale que le jet remonte au niveau de la surface libre, lorsque l'atmosphère est la même de part et d'autre. La vitesse v est la vitesse qu'acquiert un corps pesant en tombant d'une hauteur H suivant un chemin quelconque sans frottement. La grandeur de cette vitesse ne dépend que de la hauteur de chute, sa direction et la forme de la courbe décrite pendant la chute.

Quand le jet est mince, il faut tenir compte de la tension superficielle; à l'intérieur du jet de diamètre $2r$, la pression est égale à la pression de l'atmosphère augmenté de $\frac{F}{r}$; c'est sous l'influence de la hauteur $H = \frac{F}{\rho g r}$, que se fait en réalité l'écoulement

et on a

$$v = \sqrt{2g \left(H - \frac{F}{r} \right)}$$

Dans les expériences de laboratoire, cette influence peut être rendue très grande. Pour des diamètres du jet $2r$ égaux à 2 millimètres, et à $0^{\text{mm}} 2 \frac{F}{r}$ équivaut à 8 millimètres et à 80 millimètres de hauteur d'eau. Le jet monte beaucoup moins haut que la surface libre, sa différence fournit même une assez bonne mesure de la tension superficielle.

Le jet se résout en gouttes, cela tient à ce que la forme cylindrique allongée n'est pas stable (Plateau). Expérience avec un fil trempé dans l'huile.

..... Expérience avec une goutte de mercure sur du verre, étirée entre deux fils de cuivre amalgamé. On peut se faire une idée par expérience du temps qui s'écoule pour un cylindre immobile entre le moment où la forme cylindrique est obtenue et le moment où la résolution en gouttes se produit. Pour un jet de même diamètre ce temps multiplié par la vitesse à l'orifice est justement égal à la longueur horizontale de la partie lisse du jet.

Les gouttes se forment et vibrent; on peut les voir immobiles, en regardant le jet à travers un disque tournant percé de fentes radiales équidistantes, lorsque la durée d'une vibration est égale au temps qui s'écoule entre les passages de deux fentes consécutives.

Débit. — On n'obtient pas le débit exact en multipliant la vitesse par la surface de l'orifice, mais un débit trop grand. Ce n'est pas dans l'orifice que

vitesse sont parallèles mais à une petite distance en dehors, là où le jet a sa section minimum, et est devenu cylindrique. Deux causes contribuent à donner au jet une forme amincie à partir de l'ouverture; d'abord la tension superficielle de la surface libre qui se raccorde à la paroi; ensuite la continuité du mouvement du liquide, qui parallèle à la paroi mince tout près de l'orifice à l'intérieur, ne peut lui devenir subitement perpendiculaire, dans le jet; pour un petit volume liquide, comme pour un solide, les changements de direction du mouvement ne peuvent se produire que progressivement sous l'influence de forces finies. Un angle vif dans le trajectoire ne pourrait résulter que d'un choc, et il n'y a rien de capable d'en produire. Ainsi le parallélisme de mouvement des filets liquides, qui ont passé les uns près des bords de l'ouverture, les autres près du centre, n'est réalisé qu'à une certaine distance, et c'est là seulement, dans une section évidemment inférieure à l'orifice, que la vitesse moyenne est celle que donne la formule de Torricelli. Lorsque le jet est assez gros pour que l'influence de la tension superficielle soit négligeable, la forme qu'il prend à la sortie d'un orifice circulaire est à peu près indépendante de la vitesse, et la section contractée s est une fraction déterminée de la surface de l'orifice. Le débit I en mètres cubes par seconde est égal au produit de la vitesse de Torricelli en mètres par seconde, par l'aire de la section contractée en mètres carrés.

Définition de la pression dans un fluide en mouvement

Considérons dans le fluide deux portions matérielles distinctes;

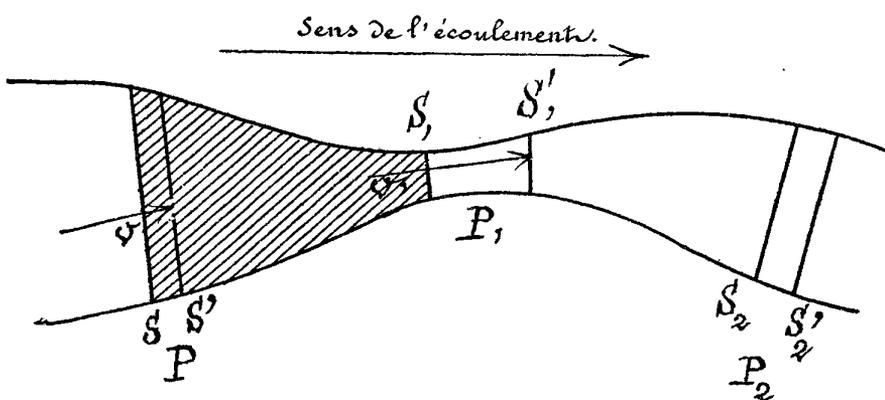
supposons par exemple que l'une d'elles soit coloré par une substance qui ne se diffuse pas sensiblement, et que l'autre soit incolore. Si nous supprimions la partie incolore, pour conserver à la partie colorée exactement le même mouvement, il faudrait appliquer à chaque unité de la surface de séparation devenue libre une pression convenable, normale dans un fluide dont le frottement interne est négligeable. Cette pression est celle qu'exerce effectivement en chaque point le fluide incolore sur le fluide coloré. La définition est aussi simple que dans un fluide en repos, la mesure seule est incomparablement plus difficile et souvent très incertaine. La certitude n'est obtenue que dans un seul cas, celui où l'on mesure par un baromètre ou un piston en repos la pression en un point de la paroi, le long de laquelle glisse le fluide; on peut en effet rendre mobile une partie de la paroi, par exemple en faisant un trou et le fermant par une lame de caoutchouc, sans rien changer au mouvement du fluide; la pression qu'il faut exercer extérieurement pour empêcher la lame de caoutchouc de se gonfler, ou de se creuser mesure justement la pression qu'exerce le fluide en mouvement. Quant aux points pris dans la masse même du fluide, la mesure est presque impossible; un appareil immobile, soit posé sur le fond, soit immergé et soutenu par des cordes ou des échafaudages apporte dans le mouvement du liquide un trouble dont il est très difficile de tenir compte. Un appareil mobile avec le fluide, et qui y flotte, vaut mieux (un baromètre dans un aérostat entraîné avec le courant d'air général), mais à la condition que ses indications soient

indépendantes de la loi de son mouvement d'ensemble, ce qui n'arrive que pour un appareil à ressort, de masse négligeable; et encore faudrait-il savoir en lire les indications.

Extension du principe de Torricelli. - Mettons en évidence dans la hauteur H , les deux termes, celui qui provient de la différence de niveau, H , et celui qui provient de la différence des pressions sur les deux surfaces, H' , exprimées en colonnes d'eau:

$$H + H' = \frac{v^2}{2g}.$$

Considérons en particulier un tube horizontal dont la section variable d'un point à l'autre, n'éprouve cependant aucun changement brusque. $H = 0$. - Si les parois sont parfaitement lisses, et si les frottements sont négligeables, la formule de Torricelli s'applique, à une section quelconque, H' étant l'excès $P_0 - P$ de la pression P_0 en un point où la vitesse est nulle, sur la pression P au point où la vitesse est v . Entre deux points



où les vitesses et les pressions sont $v_1, P_1, P_1,$
 $v_2, P_2, P_2,$
l'appli-
cation

De la formule de Torricelli donne, par soustraction,

$$P - P_1 = \frac{1}{2g} (v_1^2 - v^2) \quad (1)$$

D'autre part le liquide est incompressible, une partie

du liquide comprise entre les sections S et S_1 , s'est avancée sans changer de volume, et occupe au bout de quelque temps l'espace compris entre les sections S' et S'_1 . La section S et la section S_1 se sont avancées pendant le même temps t avec les vitesses v, v_1 , en décrivant des volumes égaux, $S \cdot v \cdot t, S_1 \cdot v_1 \cdot t$, dont la valeur commune est par définition le produit du débit I par le temps t .

Dans le cas du mouvement permanent, [vitesse indépendante du temps en chaque point du tube] le principe des forces vives fournit directement l'équation générale suivante entre les pressions et les vitesses en deux points d'une même ligne de courant, en deux points qu'atteint successivement la même masse liquide mobile:

$$P - P_1 + h = \frac{1}{2g} (v_1^2 - v^2)$$

Le travail des pressions appliquées au liquide pendant le temps très court t , est:

$$\text{pour la section } S \quad P \cdot S \cdot v \cdot t = P \cdot It$$

$$S_1 \quad - P_1 \cdot S_1 \cdot v_1 \cdot t = - P_1 \cdot It$$

pour les parois du tube: 0

car la pression des parois est perpendiculaire à la vitesse.

$$\text{Total} \dots \dots \dots (P - P_1) It$$

Si le centre de la section S est à une hauteur h au dessus du centre la section S_1 , le travail de la pesanteur dû au passage du volume d'eau It de SS' en $S_1S'_1$ est hIt . La force vive du liquide compris entre S et S_1 n'a pas changé, car la distribution des vitesses est restée la même; l'accroissement de force vive du système entier est donc l'excès de la force vive du volume $S_1S'_1$ sur la force vive du volume SS' ou

$$\frac{\rho}{2} \cdot It \cdot v_1^2 - \frac{\rho}{2} \cdot It \cdot v^2$$

ρ étant la densité mécanique du liquide en mouvement,
 $\frac{1}{g}$ pour l'eau dont le poids spécifique est 1.

On a donc

$$v = \frac{I}{S} \quad , \quad v_1 = \frac{I}{S_1}$$

$$P - P_1 = \frac{I^2}{2g} \left(\frac{1}{S_1^2} - \frac{1}{S^2} \right)$$

Cette formule montre que la pression est minimum dans la section la plus étroite, là où la vitesse est la plus grande. Après que le liquide a dépassé la section minimum, s'il continue à remplir tout le tube, il marche vers des pressions croissantes. C'est ce dont il ne faut pas s'étonner; les pressions, qui sont ici les forces motrices ne déterminent pas le sens de la vitesse, et par suite du mouvement, mais le sens de l'accélération. Le liquide se meut à partir de la section minimum vers les pressions de plus en plus grandes, parce que l'augmentation de section a pour conséquence une diminution de vitesse; le mouvement du liquide se ralentit à mesure qu'il s'éloigne de la section minimum; l'accélération est négative. Étant donnée la section S_2 par laquelle se fait l'écoulement à l'air libre, avec un débit I , il est facile de calculer la section minimum S_1 de manière que P_1 soit nul, P_2 étant une atmosphère.

Exemple: [longueurs en mètres].

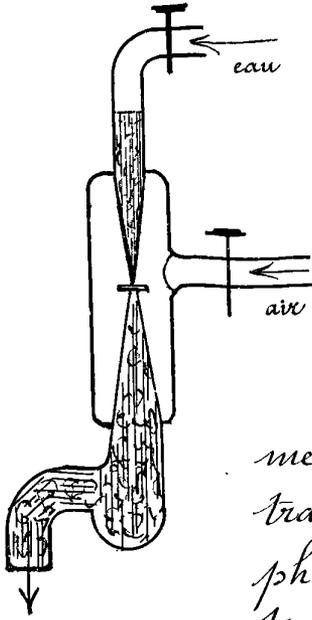
P_2 , 1 atmosphère en hauteur d'eau	= 10,33
S_2 , 1 centimètre carré	= 0,0001
I , un dixième de litre par seconde	= 0,0001
g ,	= 9.81

$$S_1 = \frac{1}{\sqrt{\frac{2gP_2}{I^2} + \frac{1}{S_2^2}}} = 0,000007$$

7 millimètres carrés, 84 millimètres de diamètre environ. On remarquera le peu d'influence

du terme $\frac{1}{S_2^2}$ dès que S_2 est grand.

L'appareil construit conformément aux données ainsi calculées pourra servir à faire le vide; il est connu sous le nom de trompe à eau, et sert constamment dans les laboratoires de physique et de chimie. — On peut en effet, faire une ouverture dans le tube, à la section minimum et la mettre en communication avec un réservoir quelconque, plein d'air.

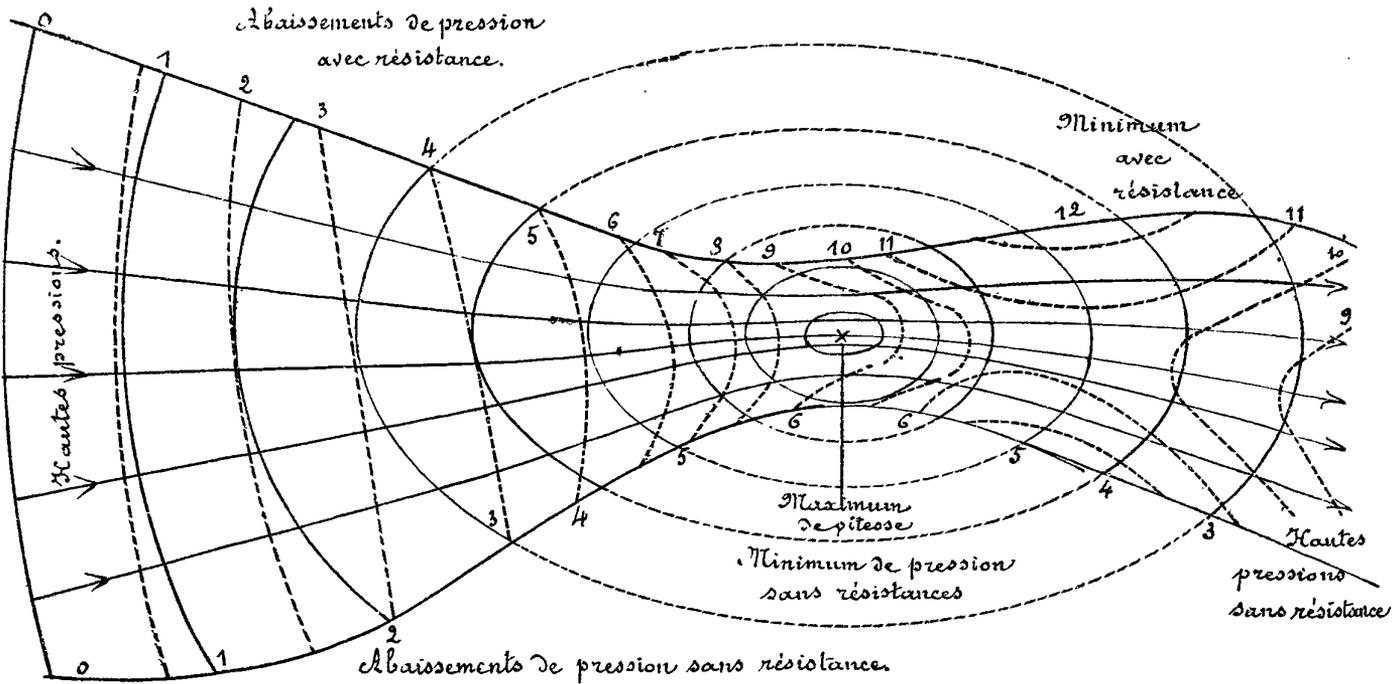


Dès que l'écoulement de l'eau commence, la pression dans la section contractée devient inférieure à la pression atmosphérique, le gaz se précipite dans l'ouverture et est entraîné avec le liquide au dehors; et quand le débit est assez grand, il ne peut y avoir équilibre dans le réservoir qu'après qu'il est vide d'air, et que la pression est réduite à la tension maximum de la vapeur d'eau pour la température du laboratoire, quelques centimètres de mercure, ou même, à moins encore, en interposant des vases desséchants entre la trompe et le réservoir à vider.

Distribution des pressions. — Remarquons comment ces pressions se distribuent dans un large courant horizontal à peu près rectiligne dont la vitesse est moindre sur les bords qu'au milieu, et qui ne subit aucun frottement sensible, lorsque la section de ce courant d'abord très large se rétrécit progressivement puis s'élargit de nouveau. Comme dans la trompe à

eau, le rétrécissement de la section a pour conséquence

un accroissement de vitesse; d'ailleurs la pression dans le bassin d'où sort le courant est sensiblement uniforme, l'abaissement de pression est donc le plus grand au milieu du courant dans la région la plus



étroite, il y a là un minimum de pression fermé, puis des surfaces d'égale pression qui passent par les points d'égale vitesse et entourent le minimum, et les hautes pressions dans les deux régions où la section est très large. Cette forme des courbes d'égale pression dans un courant sans frottement n'indique rien à l'avance quant à la direction de la vitesse qui peut être parallèle à ces lignes, perpendiculaire ou oblique quelconque; elle renseigne seulement sur la grandeur de la vitesse.

Influence des résistances. - Nous avons vu que dans un très vaste courant, comme ceux qui peuvent naître au milieu de l'Océan, l'influence du frottement interne met des siècles à franchir quelques centaines de mètres lorsque le courant

est calme, et lorsque la matière qui la forme ne se renouvelle pas. Mais ce calme complet, cette invariabilité de la matière composante sont à peu près impossibles. Dans l'océan marin ou aérien le courant est dû à des différences de température, il en résulte qu'il s'étale constamment par le haut, et se nourrit par le bas; il se mêle ainsi avec les couches presque immobiles qui forment ses rives, et les entraîne dans son mouvement en se ralentissant lui-même. C'est sur une échelle incomparablement plus grande le même phénomène par lequel dans la théorie cinétique des gaz (p. 45 et 46) nous avons expliqué le frottement; ici aussi, nous pouvons employer le même mot pour un phénomène analogue, lorsque nous nous bornons à l'étude du mouvement d'ensemble de volumes de plusieurs centaines de mètres cubes dans l'air, sans analyser le détail des mouvements intérieurs à ces volumes. - Il en est de même lorsque le courant rencontre à la surface du sol une série d'obstacles - terrains accidentés, rochers, montagnes, constructions, forêts, etc. - Il vient s'y briser, perd une partie de son mouvement horizontal - [en communiquant à ces obstacles des vibrations plus ou moins énergiques, qui se transforment en chaleur soit sur place, soit au loin dans le sol où elles se propagent] - puis une fois ralenti se rejette soit de côté, soit vers le haut dans le reste du courant qui n'avait pas rencontré d'obstacle, et le ralentit à son tour. Ces résistances que le courant rencontre ainsi sur ses bords et sur le fond joueront un rôle analogue à celui d'un frottement

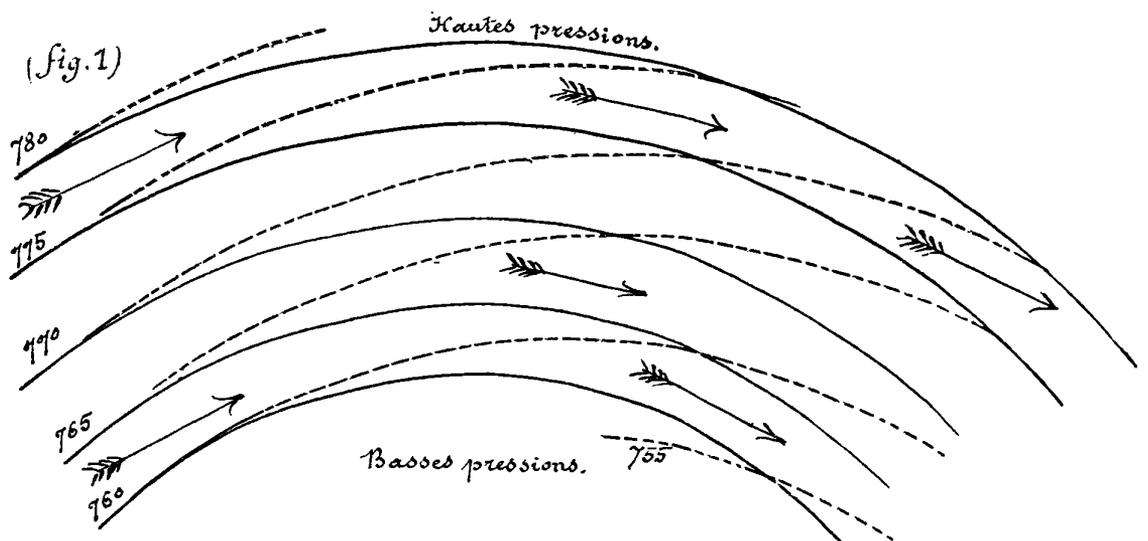
directement opposé au mouvement général, et appliqué dans les courbes extérieures du courant. Pour que le courant soit permanent, il faut alors que les pressions soient distribuées un peu autrement; l'excès de la pression en un point du courant sur la pression en un point situé en aval doit être plus grand que celui qui correspondrait à la différence des vitesses - surtout sur les bords. La pression décroît plus vite en allant de l'origine du courant vers la section minimum, et croît moins vite en continuant à descendre le courant au delà de la section minimum. C'est là ce qu'indiquent les lignes discontinues - - - - - .

Suivant l'importance des résistances, suivant que leur influence pénètre jusqu'à l'axe du courant, le minimum peut être plus ou moins éloigné de la section la plus étroite; si la section du lit est peu variable, l'influence des résistances peut devenir dominante; les isobares dans un plan horizontal sont alors des sortes d'ovales extrêmement allongés dans le sens du courant. Les pressions les plus basses ne correspondent pas toujours au milieu du courant, où cependant les vitesses sont plus grandes et les résistances moindres que sur les rives.

Rappelons que la largeur du croquis est destinée à figurer la section droite du courant. Lorsqu'un courant coule dans un canal découvert, à fond horizontal à rives verticales, la section droite varie ordinairement en sens inverse de la largeur; le liquide se ralentit, sa surface libre s'élève là où les rives sont rapprochées, et la pression sur

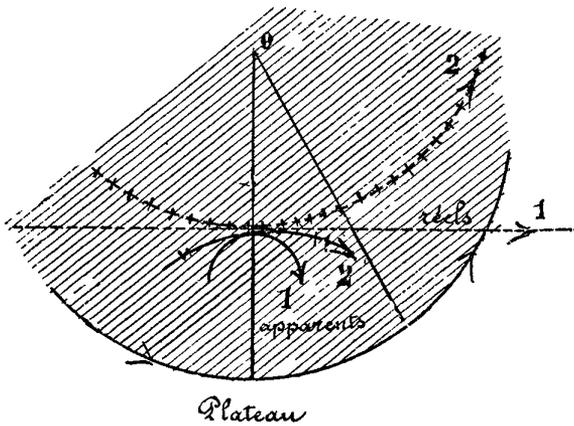
le fond augmente.

Influence de la courbure du courant dans son plan horizontal. - Pour faire décrire une circonférence à un corps mobile, il ne suffit pas de le pousser suivant la tangente, il faut encore le tirer constamment vers le centre, soit en l'attachant par un fil, soit en le plaçant sur une cuvette ou un entonnoir, soit par tout autre moyen; la force avec laquelle il faut tirer vers le centre, est égale au produit de la masse par le carré de la vitesse, et par l'inverse du rayon de la circonférence. Il en est naturellement de même quand on fait parcourir un tube courbé dans un plan horizontal par un courant liquide; pour ramener le liquide vers le centre, il faut que la pression aille en croissant depuis les plus petites circonférences jusqu'aux plus grandes - Un tuyau d'arrosage en caoutchouc se redresse quand on ouvre le robinet; c'est que dans les parties courbes l'eau en mouvement exerce une réaction plus grande vers l'extérieur de la courbe que vers l'intérieur, sur la paroi du tube, et le déroule. La figure (1) indique la



distribution des pressions dans un courant curviligne horizontal permanent de vitesse uniforme qui n'est soumis à aucune action étrangère ; les traits pleins dans le cas où la résistance est nulle, pointillés dans le cas contraire.

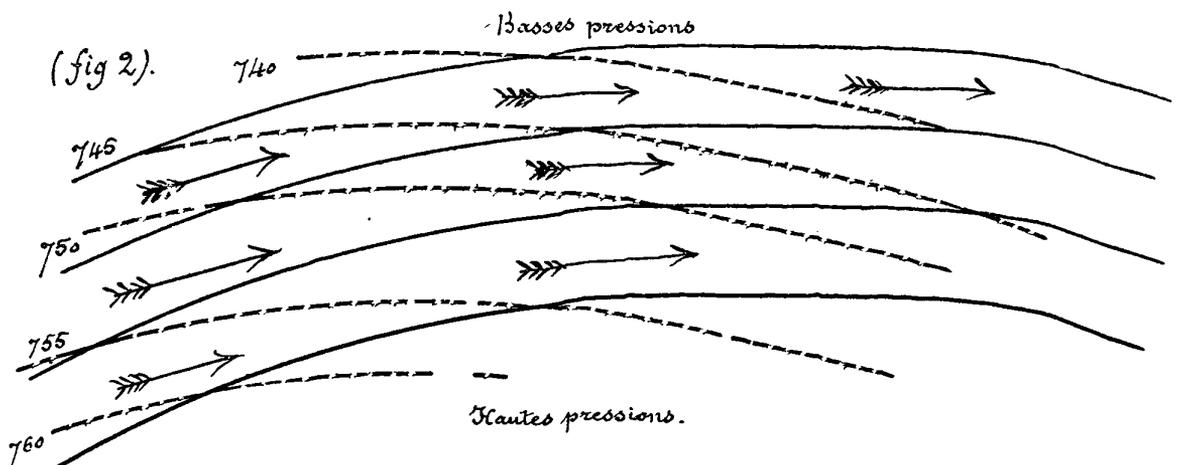
Quand l'observateur au lieu d'être immobile, est lui-même en mouvement rapide porté par exemple par un plateau tournant (sur une plate-forme des chevaux de bois, par exemple), un courant rectiligne (1) dans l'espace, paraît courbé (1) sur le plateau en sens inverse du mouvement du plateau,



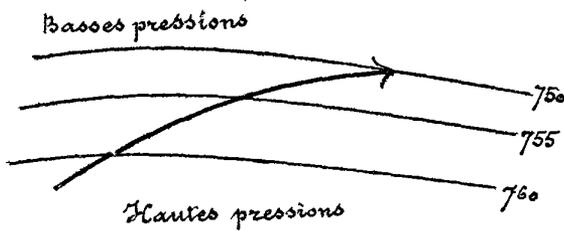
si sa vitesse par rapport au plateau n'est qu'une petite fraction de celle du plateau.

Un chemin apparent 2 + + + + + un peu moins courbé que 1 correspond à un chemin réel dans l'espace 2 + + + + +

courbé vers la gauche, et exige par conséquent que la pression soit plus grande à droite du chemin apparent qu'à sa gauche. C'est ce que représente la figure 2.



Une distribution analogue se produit dans l'Océan et dans l'atmosphère, par suite du mouvement de la terre; un mobile libre, de toute autre action que la pesanteur, paraît décrire par rapport à la terre qui se déplace elle-même, un chemin courbe dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord, en sens inverse dans l'hémisphère sud; car le mobile, qui conserve sa vitesse en grandeur, se meut vers l'est plus vite que la terre quand il est près du pôle, moins vite quand il est près de l'équateur. Dans tout courant aérien permanent qui ne souffle pas en tempête, la courbure apparente est ordinairement dirigée vers la droite, et faible, et les basses pressions à gauche du courant dans l'hémisphère nord.

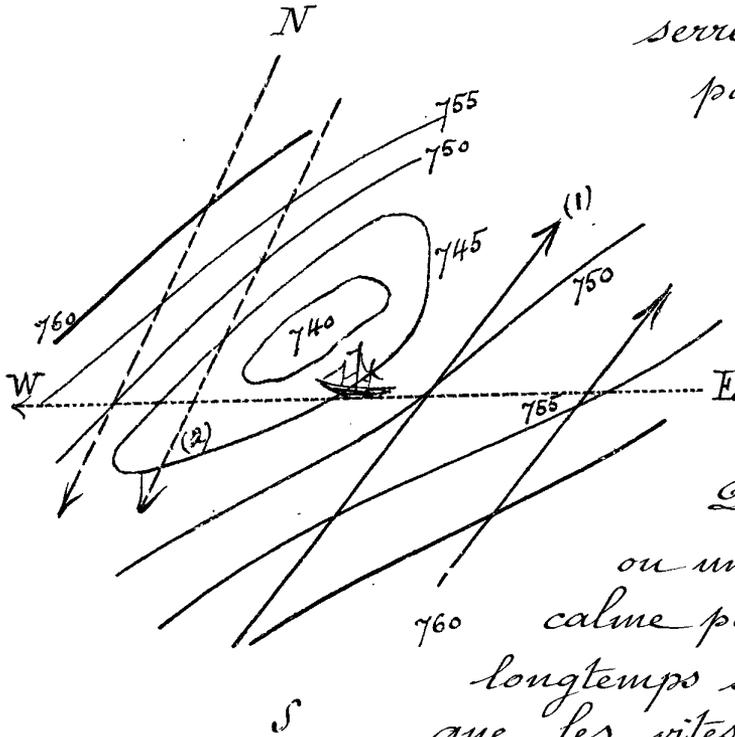


En outre, lorsque la vitesse du courant est à peu près la même dans tout son parcours les

pressions décroissent lentement dans le sens du courant; au ras du sol, à cause de la résistance de celui-ci, et le vent des girouettes, moins régulier que celui des nuages, incline un peu vers les basses pressions, plus sur la terre ferme que sur l'Océan, sur les régions accidentées que sur les plaines. Mais il suffit pour masquer ce dernier effet que le courant, d'ailleurs permanent, se ralentisse et s'étale à mesure qu'il avance.

Une bande de basses pressions avec un minimum, doit donc être occupée normalement par deux courants de direction opposée qui se côtoient.

ou se superposent, en partie, et quand les cartes météorologiques ne montrent que l'un de ces courants (1) on peut présumer que l'autre (2) existe dans les hauteurs, et se fera bientôt sentir au niveau du sol, si les isobares correspondantes sont serrées, - ou bien va dis-



servées, - ou bien va disparaître si les isobares de son côté sont très espacées. - C'est alors que le mouvement des nuages fournit de précieux renseignements. -

Deux pareils courants, ou un courant et un bord calme peuvent se côtoyer très longtemps sans s'entamer, lorsque les vitesses sont comprises entre des limites convenables, comme il arrive pour les courants glacés qui descendent du pôle, et le golf Stream dans l'Océan atlantique. Un navire qui passe de l'un à l'autre en allant vers l'Ouest par exemple, rencontrera d'abord des vents du S. O., modérés avec un temps doux et couvert, et quelques pluies; en passant par la plus basse pression, il éprouvera une suite de vents, mais sans violence, - et sans passer par une période de calme comme dans les cyclones - le ciel se dégagera assez rapidement, et la température baissera. D'autres navires suivant une marche

parallèle mais les uns au Nord, les autres au sud éprouveront tous les mêmes successions de vents; rien de particulier ne distinguera le passage par le centre de la courbe de plus basse pression. Le plus souvent il y a entre les deux courants une couche de quelque largeur dans laquelle ils se mélangent et qui est marquée par des pluies; il en est de même au bord d'un courant humide et d'une aire de calme. En outre la variation de température très faible dans toute la largeur d'un courant, surtout humide, est très rapide quand on passe d'un des courants à son voisin, tant à cause des régions d'où ils proviennent, qu'à cause de la clarté du ciel dans le courant sec et de la facilité de rayonnement qui en résulte. Les bords du courant humide pourront donc être définis par la limite de ciel couvert ou très nuageux, par les pluies, par les différences notables de température de part et d'autre, indépendamment de toute considération des isobares.

Lorsque ces trois caractères sont d'accord, ce qui arrive très souvent, aucun doute ne peut subsister sur l'existence de ce courant, et ce sont les déplacements de ses bords qu'il importe de suivre pour la prévision du temps.

C'est seulement quand ces trois caractères font défaut, et quand en outre le vent des cartes tourne nettement en demi-cercle au moins autour du minimum de pression, que ce minimum doit être interprété comme un centre de mouvement tournant, cyclone ou bourrasque, suivant les cas, et

qu'il faut tracer la trajectoire de la bourrasque dont le centre est généralement peu éloigné du minimum de pression.

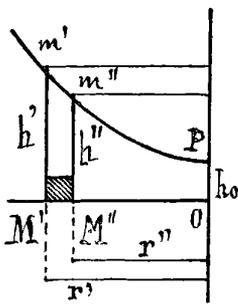
Étudions donc ces mouvements tournants dans les liquides.

Mouvement d'un liquide dans un vase rond.

La loi de la pression en fonction du rayon de la circonférence décrite par le liquide dépend de la loi des vitesses en fonction de la distance au centre.

Le cas le plus connu est celui du liquide qui tourne comme un solide, avec une vitesse angulaire uniforme dans toute son étendue, et par conséquent une vitesse linéaire proportionnelle à la distance à l'axe. Lorsque l'axe est vertical, la surface libre a, comme le montre l'expérience, la forme d'une coupe concave vers le haut avec un plan tangent horizontal sur l'axe.

C'est une surface de révolution autour de l'axe, dont la ligne méridienne



est une parabole ayant son sommet sur l'axe de révolution. Un petit cube dont les faces $M'M''$ sont à des distances r', r'' de l'axe très peu différentes, subit un excès de pression $sg(h'-h'')$ vers l'axe [d , densité du liquide; g , intensité de la pesanteur; s étendue de chacune des faces $M'M''$]. Sa masse est $s(r'-r'')$; la circonférence qu'il décrit a un rayon $\frac{r'+r''}{2}$ et sa vitesse linéaire

est $A \frac{r'+r''}{2}$, en appelant A la vitesse angulaire de l'ensemble, ou l'angle décrit par le rayon en une seconde. Pour que le petit cube liquide décrive cette circonférence sans s'en écarter il faut que la force $sg(h'-h'')$ qui le pousse vers le centre ait pour valeur $s(r'-r'')d \times A^2 \frac{r'+r''}{2}$, comme il est dit dans le texte; d'où l'on tire

$$h' - h'' = \frac{A^2}{2g} (r'^2 - r''^2)$$

$$\text{IRIS - LILLIAD}^{\text{un}} \text{ université Lille } h' - \frac{A^2 r'^2}{2g} = h'' - \frac{A^2 r''^2}{2g}$$

La quantité $h - \frac{A^2 r^2}{2g}$ ne varie pas en passant d'un point du rayon à un point voisin; elle est donc constante sur tout le rayon MO, sa valeur constante est celle qu'elle prend en particulier sur l'axe, h_0 , où r est nul. On a donc $h - h_0 = \frac{A^2}{2g} r^2$ pour définir la hauteur d'un point m de la surface libre au-dessous du point P où cette surface coupe l'axe de rotation. Cette équation représente comme on sait une parabole dont l'axe géométrique coïncide avec l'axe de rotation.

Cette surface se relève d'abord très lentement à partir de l'axe, puis de plus en plus vite à mesure qu'on s'éloigne. Pour tracer les isobares équidistantes sur le fond, coupons la surface libre par des plans horizontaux séparés par une même distance verticale, 1 centimètre par exemple. Pour un liquide quelconque tournant à raison de 7 tours par seconde, [$A = 44$, $\frac{A^2}{2g} = 1$, rayons et hauteurs en centimètres].

Excès de la pression à distance r de l'axe sur la pression au centre:	0	1	2	3	4	5	9	100
rayon correspondant.	0	1	1,4	1,73	2	2,24	3	10

Les isobares se resserrent très vite à mesure qu'on s'éloigne de l'axe. Cette distribution d'isobares, avec des vitesses tangentes aux isobares, est caractéristique du mouvement de rotation d'ensemble du liquide. Notons que le caractère de permanence du mouvement, et la connaissance de la distribution des vitesses déterminent complètement la distribution des pressions, par conséquent le poids des colonnes fluides au-dessus du plan du fond, ou ce qui revient au même dans le cas des liquides, la hauteur de ces colonnes jusqu'à la surface libre.

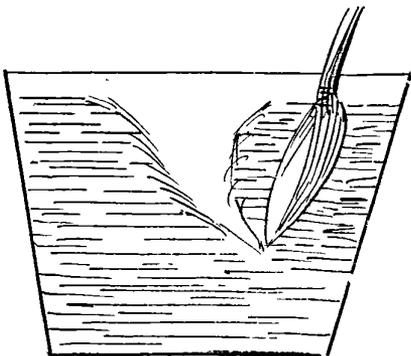
Toutefois les mouvements de rotation de ce genre, assez faciles à réaliser dans des vases de petites dimensions

n'ont aucune application dans les grands mouvements de l'Océan ou de l'atmosphère; ils exigent en effet pour se produire l'intervention du frottement interne du liquide, et nous avons déjà vu à combien de siècles cela correspond, dès que l'étendue du liquide dépasse quelques centaines de mètres. - Le mouvement de rotation commence donc autrement; il y a un état permanent tout différent qui s'établit dès qu'on essaie de faire tourner le liquide, et qui seul est vraiment intéressant.

1° Il est très difficile d'entraîner le liquide en faisant tourner le vase qui le contient autour de son axe de figure.

Expérience avec un cristalliseur et des morceaux de pain à cacheter sur l'eau. - Un mouvement de rotation brusque du cristalliseur ne déplace pas les pains à cacheter. - Avec de l'huile au lieu d'eau, on a un déplacement sensible des pains à cacheter les plus près du bord.

2° On essaie de faire tourner l'eau en y faisant tourner une spatule - (une cuiller dans une tasse de thé) - et dès que le mouvement est un peu rapide, on voit le liquide se creuser au centre de la tasse,

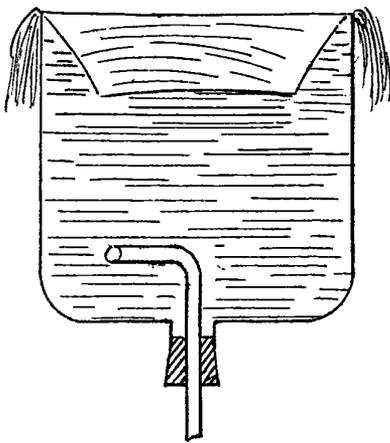
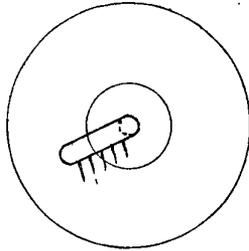
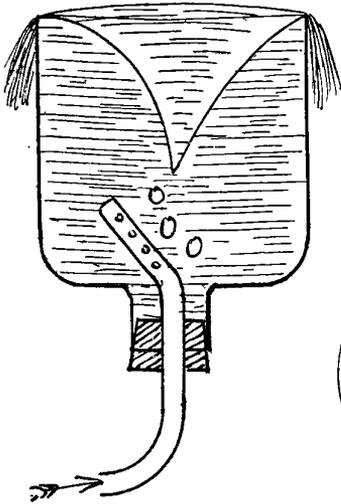


et former une sorte d'entonnoir dont la pointe vide de liquide, et occupée par de l'air, aboutit à la cuiller, soit d'une manière permanente, soit en se résolvant en bulles à sa partie inférieure.

Même phénomène plus régulier lorsqu'on verse abondamment de l'eau sur le bord d'un entonnoir de manière à la faire tourner à l'intérieur. Elle se creuse en forme d'entonnoir, ou plutôt de pavillon de trompette ouvert vers le haut, et s'étendant souvent jusqu'en bas de l'entonnoir, en sorte que le liquide s'écoule en tournoyant sous forme de gaine tubulaire entourant un tube d'air.



Même forme encore, si nous faisons arriver par en bas dans une cloche tubulée un jet de liquide perpendiculaire au plan méridien - Au moyen d'un tube de verre coudé, fermé au bout, mais percé de plusieurs trous sur le côté - Le liquide tournoie s'élève et se déverse par dessus le bord du vase.



Si le liquide arrive par un seul trou placé à quelque distance de l'axe, la partie externe du liquide forme toujours l'entonnoir en tournoyant vivement; la partie centrale se meut à peine, d'un mouvement de rotation analogue à celui d'un solide - la partie centrale de la surface est presque plate.

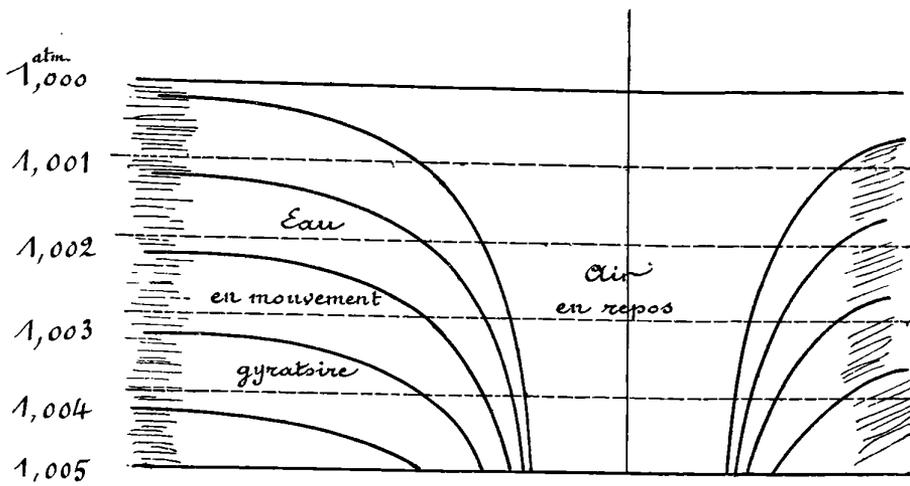
Ainsi cette forme en entonnoir est caractéristique du mouvement tournoyant spontané d'un liquide sans frottements quand les vitesses horizontales sont très grandes; elle se produit également bien que le mouvement vertical soit dans son ensemble descendant (entonnoir), ascendant (cloche renversée) ou nul (tasse à café). Il est d'ailleurs facile de rattacher ces trois formes à peine différentes et particulièrement la dernière au principe de Torricelli⁽¹⁾. Son caractère essentiel c'est que la vitesse varie en raison inverse de la distance à l'axe, et la pression en raison inverse du carré de cette distance; nulle à très grande distance, elle deviendrait infinie sur l'axe, si le liquide s'y trouvait, et s'il n'avait pas de tension superficielle; c'est ainsi qu'il se forme soit un tube creux, soit des bulles d'air, soit une région centrale animée d'un mouvement différent.

Ici encore la distribution des vitesses commande la distribution des pressions, et par conséquent la forme de la

⁽¹⁾ Tout le liquide qui s'écoule par l'entonnoir provient du jet qui sort de la carafe avec la vitesse v_0 et je suppose le frottement négligeable. En un point quelconque du liquide situé à une distance H_0 au dessous de l'orifice de la carafe et où la pression exprimée en hauteur d'eau dépasse de H' la pression de l'atmosphère est donc par le principe de Torricelli $\sqrt{2g(H_0 - H') + v_0^2}$. Supposons que le mouvement de descente soit extrêmement lent; le liquide se meut sensiblement sur une circonférence horizontale, ce qui exige que chaque élément de volume $s(r' - r'')$ supporte du côté extérieur une pression plus grande que du côté de l'axe $s g d(H' - H'')$, égale à $s(r' - r'') dx \sqrt{v^2 + 2g(H - H')}$; $r' - r''$, $H - H'$ étant deux quantités infiniment petites. L'intégration de cette¹ équation donne la forme de la surface libre $(H + \frac{v_0^2}{2g}) r^2 = \frac{v_0^2 r_0^2}{2g}$.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

surface libre. Cette surface supporte la pression atmosphérique uniforme. Nous obtenons les surfaces qui correspondent à la

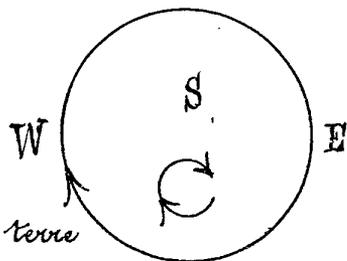
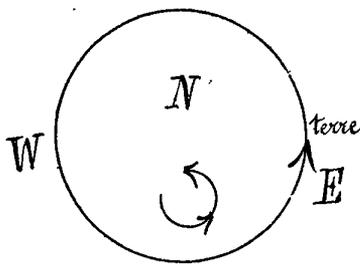


pression atmosphérique (10333 Kgr par mètre carré) augmentée de 10, 20, 30 Kilogrammes par mètre carré, en

abaissant cette surface de 1, 2, 3 centimètre le long de l'axe, les intersections de ces surfaces par un même plan horizontal nous donnent les isobares correspondantes, évidemment très serrées près du centre, et de plus en plus écartées à mesure qu'on s'en éloigne, - tout le contraire du premier cas. C'est une distribution de ce genre qui se produit dans les cyclones atmosphériques, qui présentent des vitesses de plus en plus grandes à mesure qu'on se rapproche du centre, jusqu'à un certain rayon à l'intérieur duquel règne le calme complet. Deux couches atmosphériques sont alors superposées; la couche supérieure calme et sans nuages, représentée par l'air de nos expériences, qui au point de plus basse pression est où, très près du sol, ou même arrivée jusqu'au sol. (quand le calme central est très net) - et la couche inférieure représentée par l'eau de nos expériences, animée de vitesses gyrotoires extrêmement violentes, comme le montre l'observation (Reid, - Redfield - Liddington)

et couverte de nuages au contact de la couche supérieure. Quant au mouvement vertical, l'analogie avec le mouvement liquide n'indique rien. Cette forme en entonnoir des surfaces d'égal pression est aussi la forme visible des trombes, telle que l'ont dessinée ceux qui en ont vu, ou telle qu'on la voit dans une photographie instantanée du rapport de M^r Finley sur les tornados de 1879 aux Etats-Unis. Elle est accompagnée de mouvements gyrotaires d'une extrême violence dans la couche d'air inférieure et probablement aussi dans la couche nuageuse qui la surmonte.

Une particularité importante, le sens de rotation inverse des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord, direct dans l'hémisphère Sud distingue ces cyclones et ces tornados des mouvements gyrotaires que nous faisons naître dans de petits vases, et dont le sens de rotation est quelconque. C'est évidemment à la rotation



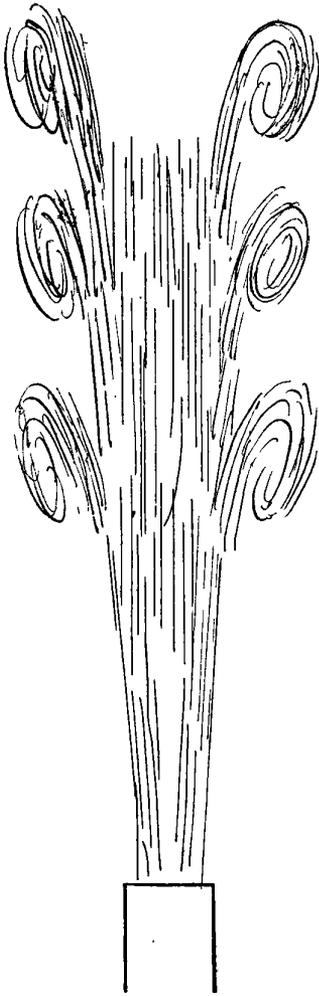
de la terre, comme cause directe ou indirecte, qu'il faut rapporter cette fixité des sens de rotation qui projetés sur l'équateur sont les mêmes que celui de la terre sur elle-même.

Naissance de mouvements tourbillonnaires dans les liquides et les gaz.

Voyez un jet de vapeur qui sort du tuyau d'une locomotive arrêtée, la fumée qui s'échappe d'un haut tuyau d'usine par un temps calme.

Corps étendu, d'abord limité d'abord finit par se troubler

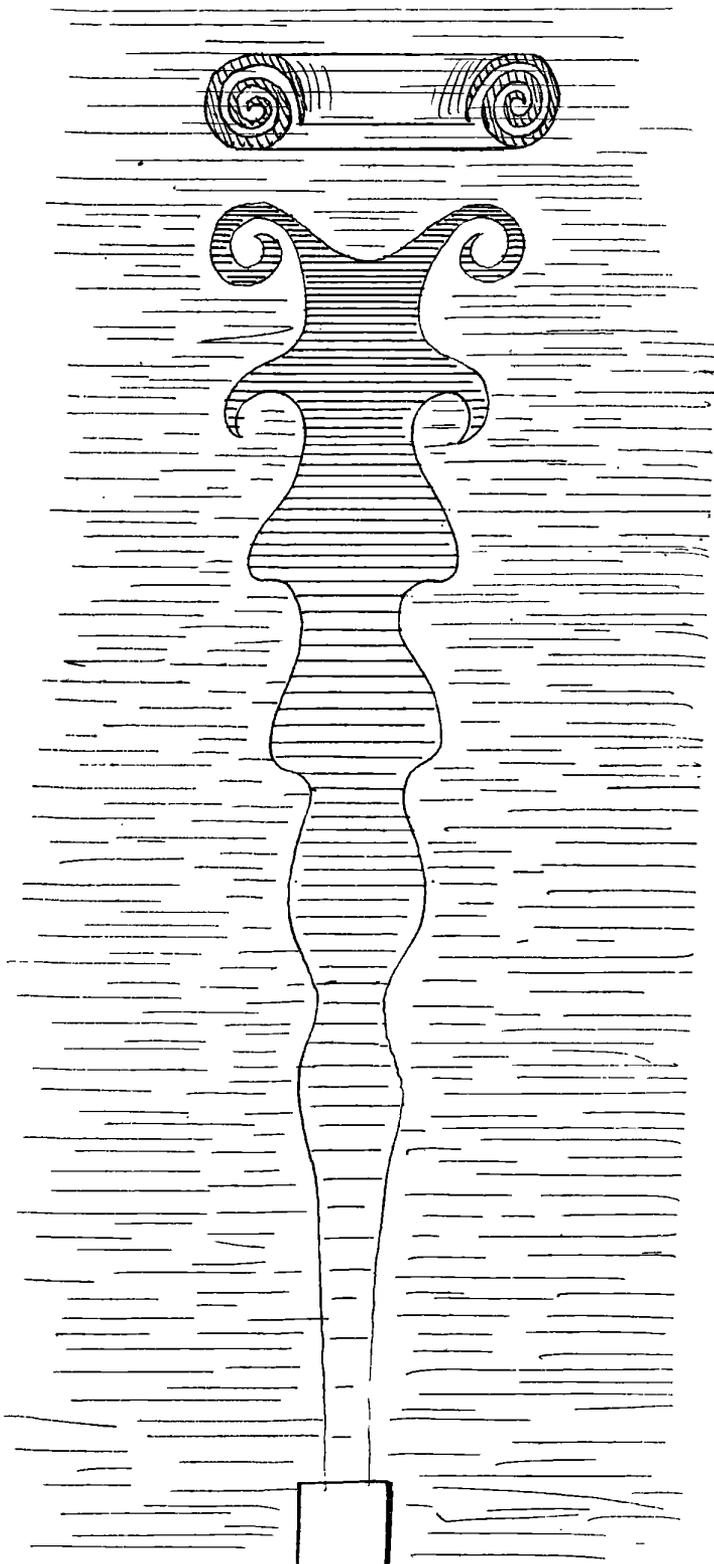
à quelque distance de l'orifice il s'étale en filaments enroulés vers l'extérieur, avec plus ou moins de régularité. Rien n'est plus facile à voir sur une cheminée peu fumeuse avec un vent extrêmement faible, ou sur la fumée d'une cigarette lancée avec quelque vitesse, sur une flamme de chandelle mal mouchée, sur un bec de gaz qui file. Chaque filament de fumée non seulement flotte en l'air, mais s'enroule sur lui-même en avançant. Il en est de même d'un jet liquide coloré, dans le même liquide incolore. Observation soit à l'œil nu, soit au moyen de photographies instantanées, montre très bien comment



il se forme le long du jet une série de renflements de plus en plus larges, puis une sorte de champignon dont les bords s'enroulent peu à peu en volutes.

Puis ces volutes deviennent moins distinctes, les spires deviennent de plus en plus nombreuses, le liquide incolore qu'elles comprennent se laisse pénétrer par la matière colorante, et enfin un peu loin, on ne voit plus qu'un anneau dont la tranche offre une coloration à peu près

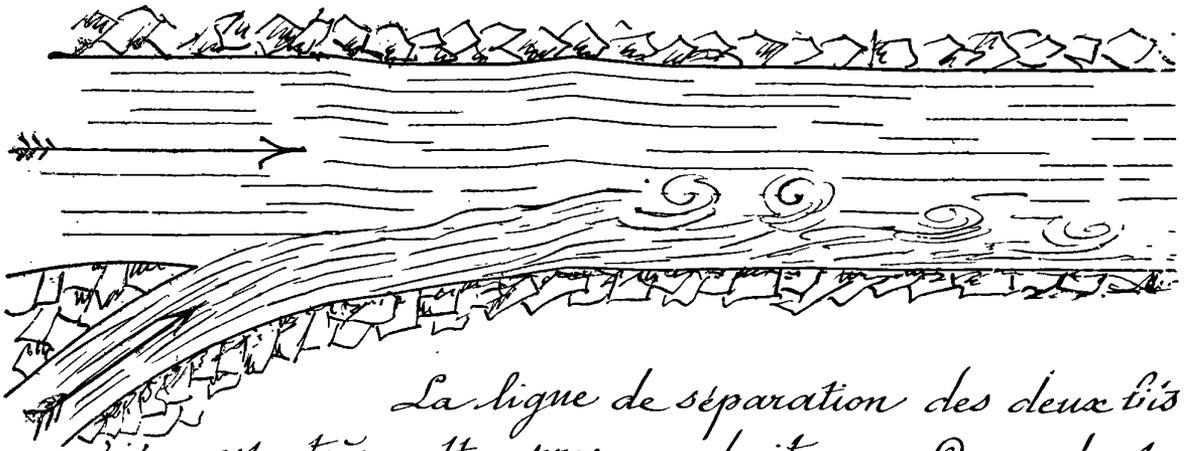
uniforme, mais dont on voit pourtant bien encore le mouvement



d'enroulement sur lui-même. Plus loin enfin, cet anneau lui-même a donné naissance à d'autres plus petits par le même mécanisme, et le mélange finit par devenir homogène.

C'est par le même mécanisme que se fait le mélange de l'eau d'un fleuve, avec celle de ses affluents. Rien de plus facile à observer lorsque le cours de l'affluent est rapide et boueux. Les deux cours restent distincts à plusieurs centaines de mètres

en aval du confluent.



La ligne de séparation des deux bords est très nette, presque droite; en descendant le cours du fleuve, on le voit d'abord s'onduler, les ondulations s'accroître, enfin des volutes se former, à axe vertical, avec la forme caractéristique en entonnoir de la surface libre - Ces mouvements tourbillonnaires se détachent, et vont s'éteindre dans le cours du fleuve, en y mélangeant les eaux de son affluent, et uniformisant la vitesse. En même temps la largeur du cours boueux de l'affluent diminue, il finit par se réduire à une mince bande le long de la rive, tandis que les tourbillons détachés ont fini par diluer toute la boue dans l'eau limpide du fleuve.

Ces tourbillons d'abord entraînés par l'affluent rapide aux dépens duquel ils se forment s'en détachent quand ils sont devenus assez violents, et vont vers le cours du fleuve. Si le fleuve marchait en sens inverse, (comme on peut le réaliser pour les jets liquides dans des expériences de laboratoire) on verrait le tourbillon d'abord projeté en travers du courant avec la vitesse de l'affluent qui l'a formé, se ralentir, puis rétrograder et marcher enfin comme le cours d'eau qui l'entoure,

après avoir décrit une sorte de parabole.

Enfin M. Wayber a montré qu'en lançant horizontalement une large lame d'air plate au milieu d'un air calme, les tourbillons qui se forment à la surface de séparation, qui pourtant est horizontale, deviennent très vite des tourbillons à axe vertical.

Tous ces faits prennent un intérêt particulier quand on songe aux cyclones qui naissent surtout dans ces régions, et à des époques où des courants presque opposés à ceux du sol règnent, par suite des Moussons, à quelques kilomètres d'altitude seulement; et dont la trajectoire est parabolique. J'ajoute que ce mode d'enroulement par spirales se trouve nettement indiqué par les descriptions des premiers capitaines dont le cyclone a atteint les navires, et ne se retrouve plus dans les suivants⁽¹⁾, pour lesquels le mélange des différentes couches gazeuses est effectué.

C'est ce mélange d'air de deux couches qui diffèrent par leur température et leur humidité, qui donne brusquement naissance à une abondante condensation et à des pluies torrentielles, parce que la capacité de saturation par la vapeur d'eau à la température du mélange, est beaucoup moindre que la somme des capacités des deux couches primitives (Duclaux p. 380).

Récapitulons ces résultats.

Deux courants d'un fluide sans frottement, animés de vitesses différentes, peuvent se côtoyer sur une grande longueur; entre certaines limites de vitesse cet état est stable; le mélange des deux courants, l'échange

de chaleur, dans les fluides réels, ne se fait qu'avec l'extraordinaire lenteur tant de fois signalée (p. 32, 45, ..). Au delà de certaines limites de vitesse, ce régime régulier des courants cesse d'être stable; la moindre perturbation fait naître dans la surface de séparation des ondulations qui grandissent de plus en plus et aboutissent à un enroulement en volutes de plus en plus serrées, et enfin à un tourbillon détaché. Quand ces volutes sont très serrées les deux masses fluides différentes qui ne se touchaient dans le courant régulier que sur une très petite surface (celle des spires) qui peut être nulle ou dix fois plus grande; de plus l'épaisseur d'une spire devient extrêmement petite; dès lors, la diffusion de matière, de mouvement ou de chaleur, peut se produire très rapidement et amène bientôt le mélange complet. C'est donc, par diffusion, consécutive de l'enroulement en spirale, que l'homogénéité finale est obtenue assez rapidement.

Remarquons encore que la production de ces mouvements résulte d'un état instable dans des courants rapides; que par conséquent le lieu et l'époque de formation du tourbillon est inal déterminé, et dépend dans une large mesure de la très faible cause perturbatrice qui déclanche le mécanisme; il ne saurait donc être question en météorologie de prévisions lointaines et précises, les effets étant hors de toute proportion avec la cause qui les provoque; et cela distinguera toujours la météorologie de l'astronomie.

Tous les phénomènes qu'on remarque à la

surface de la mer près de l'embouchure d'un fleuve quand le vent souffle, peuvent se produire à la limite de deux courants superposés, et sont révélés par l'aspect des nuages : longues houles parallèles, clapotis et moutonnement, déferlement. La seule différence importante c'est que là, où la mer par suite de sa tension superficielle donne des gouttes d'eau et de l'écume, les courants d'air donnent des spirales plus ou moins serrées et qui s'effilochent. Le mode de propagation des orages, progressif mais très rapide au dessus des plaines, puis rayonnant à partir de certains massifs montagneux, offre une frappante analogie avec la propagation du déferlement le long de la crête d'une vague sur une rive parsemée de rochers. Dans l'un et l'autre cas, la propagation suit plus ou moins grossièrement le bord du courant mais est incomparablement plus rapide que le courant général. Peut-être y a-t-il quelque chose de plus qu'une simple analogie. En tout cas, le peu d'étendue de l'orage, son caractère explosif, l'extrême rapidité de sa propagation rendront toujours impossible de formuler une prévision précise avant que l'orage ait éclaté.

Météorologie générale.

Météorologie générale.

9 Leçons.

[Les chiffres romains indiquent les Chapitres correspondants du livre de M. Duclaux].

14^{ème} Leçon.

Phénomènes astronomiques. - Actinométrie. - [XIII, XIV]

15^e et 16^e Leçons.

Courants marins - Alisés - Moussons - Circulation générale des régions tempérées. - Distribution des aires de haute pression : et des courants qui les contourment - Hiver - Été. - Baromètre [XV, XVI, XVII, XIX, XX].

17^e Leçon.

Existence de courants superposés dans l'atmosphère. Mouvements des nuages. - Observations en ballon (Gissardier) Indications sur l'état de la surface de séparation tirées de l'aspect des nuages. - Surface de séparation calme : Nuages de forme régulière, invariable, à surface inférieure, uniforme. - Surface un peu agitée par des ondulations de sens variés qui se croisent ; clapotis : nuages pommelés ou moutonnés. - Surface parcourue par de longues vagues parallèles, soit régulières soit elles-mêmes ridées ; Houle : Les nuages sont disposés en longues bandes parallèles, soit unies, soit moutonnées, séparées par des bandes de ciel bleu et paraissent converger en deux points opposés de l'horizon ; l'un des courants est alors violent, et l'on doit craindre qu'une augmentation d'amplitude de la

boule n'amène des déferlements locaux ou généraux, avec mélange de l'air des deux couches, pluies ou neiges. Au commencement, et quand ce mélange par déferlement se produit à de grandes hauteurs, l'aspect des nuages rappelle la traînée lumineuse des fusées d'artifice qui se termine par une sorte d'éclaboussure envahissant très rapidement un espace énorme dans le ciel; les vents rapides des régions supérieures vont gagner le sol en quelques heures.

18.^e Leçon.

Courants dérivés du courant principal. - Leurs conséquences dans les divers cas possibles. Exemples. - [XX, XXII].

19.^e et 20.^e Leçons.

Cyclones - Règle de Piddington. - Translation. - Distribution géographique. - Bourrasques. - Distinction entre les bourrasques proprement dites. - Minimum de pression contourné par les vents et emporté dans un courant général - et les minimums de pression résultant de la contiguïté de deux courants opposés. - Différence des situations correspondantes et des prévisions: il y a autant de nuages et de pluie à l'arrière qu'à l'avant de la bourrasque tournante. [XVIII, XXI, et Leçons 12 et 13 ci-dessus].

21.^e et 22.^e Leçons.

Orages. - Propagation. - [XXVI, et Leçons 12-13 ci-dessus].
Nuages [XXIII, XXIV]. - Divers modes de formation. - La suspension apparente des nuages résulte de la lenteur de chute

des très petites gouttes d'eau, à cause de la résistance de l'air, et de l'évaporation de ces gouttes quand elles descendent dans l'air sec. - La même variation rapide d'altitude, - sans perte ni gain de chaleur - produit une variation de température bien plus considérable pour l'air sec que pour l'air humide. - Passage d'un courant chaud et humide au-dessus d'une chaîne de montagnes - Courant calme, chapeau de nuages incessamment renouvelé. - Courant agité, très humide; haute chaîne: les nuages formés sur le flanc que gravit le courant s'y résolvent en pluie; le courant redescend sec sur le flanc opposé et se réchauffe à une température qui peut être de 10° supérieure à la température qu'il avait au même niveau de l'autre côté - Föhn - Sirocco - Pluie - Circulation des eaux pluviales - [XXVII. XXVIII].

Electricité.

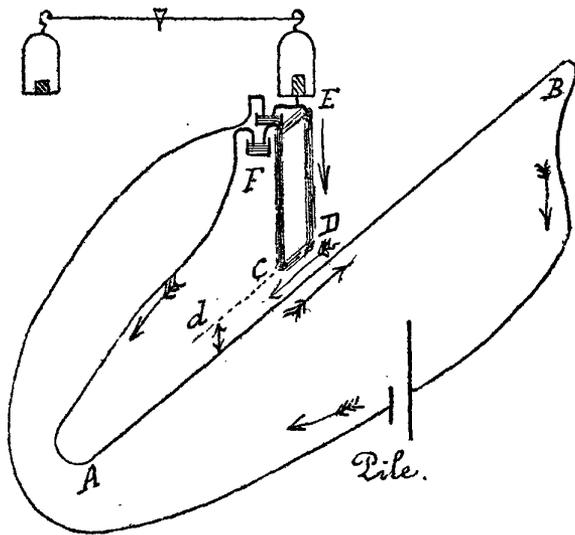
23^e, 24^e et 25^e Leçons.

Exp. - Un fil de cuivre soudé par les deux bouts à une lame de zinc et à une lame de cuivre qui plongent dans de l'eau acidulée, est dans un état tout différent d'un fil de cuivre ordinaire. Il s'échauffe, il dévie une aiguille aimantée placée dans son voisinage; si il est fin et très flexible, il se déforme en s'ouvrant le plus possible, si une partie

du fil est mobile, elle se dévie ou se déplace quand on approche une autre partie du même fil. Si on coupe le fil et qu'on plonge ses deux bouts dans une même dissolution saline, on voit l'un des bouts se recouvrir du métal en dissolution et l'autre se ronger. Pour caractériser tout cet ensemble de propriétés, qu'on retrouve toujours dès qu'on observe l'une d'elles, on dit que le fil est parcouru par un courant électrique permanent allant dans le fil vers la lame de zinc. Le choix de cette dénomination provient de ce qu'on observe des effets analogues quand on décharge une bouteille de Leyde en réunissant ses deux armatures métalliques par un fil.

Tous les fils métalliques, le mercure, les dissolutions salines permettent d'observer ces mêmes effets. Pour définir la grandeur de la propriété dont jouit le fil de jonction du zinc et du cuivre de la pile, nous nous servirons des actions motrices découvertes par Ampère, et appelées par lui électrodynamiques, qu'exercent l'une sur l'autre deux parties du fil assez rapprochées. - Suspendons verticalement au plateau d'une balance [dont aucune pièce ne soit en fer ou en acier] un cadre rectangulaire sur lequel ont été enroulés un grand nombre n de tours de fil de cuivre recouvert de coton ou de soie, les deux bouts du fil plongeant dans deux godets de mercure. Le cadre peut monter ou descendre librement sans cesser d'être parcouru par le courant que lui amènent deux fils de cuivre fixes plongés dans les mêmes godets. Au-dessous du côté horizontal du cadre, et à une distance d ;

comme quand la balance est au zéro, plaçons parallèlement un très long fil parcouru par le même courant; le cadre est attiré ou repoussé suivant que les courants, sont de même direction ou de directions opposées dans le fil fixe et dans la partie voisine du cadre mobile.



Mettons dans le plateau, - ou enlevons - des poids de manière à ramener la balance au zéro. Les expériences d'Ampère ont appris:

1° que les actions entre le fil indéfini AB , DE sont nulles.

2° que l'action du fil indéfini AB sur chaque fil

du côté CD est proportionnelle à la longueur l' du fil CD , et en raison inverse de la distance d des deux fils CD et AB ; et que les actions du fil AB sur les différents fils de CD s'ajoutent. - Il en est de même des actions sur les fils FE , et il faut en tenir compte ainsi que des actions des fils de jonction. Mais si toutes les distances sont très grandes, sauf celles de CD à AB , nous pourrions négliger toutes les autres actions. Par définition, nous regarderons les forces comme proportionnelles au produit de l' intensité du courant dans la partie fixe AB , par l' intensité du courant dans la partie mobile CD , c'est-à-dire pour le cas actuel où le courant est le même dans les deux parties, au carré de l' intensité. Pour obtenir

L'intensité I exprimée en « ampères », nom adopté universellement pour l'unité industrielle d'intensité du courant, il faudra dans l'appareil qui vient d'être décrit mesurer les longueurs d , et l , en même unité, en mètres par exemple, les poids p , ajoutés ou retranchés pour rétablir l'équilibre après le passage du courant, en milligrammes, et calculer I par la formule

$$I = \sqrt{\frac{9,81}{0,2} p \cdot \frac{d}{n \cdot l}}$$

n est le nombre de tours de fil sur le cadre mobile.⁽¹⁾

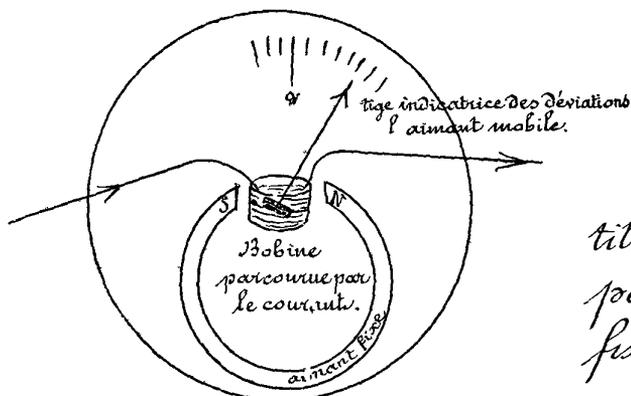
On trouve dans l'industrie électrique des balances électrodynamiques, de forme plus compliquée, graduées par les soins du constructeur et qui font connaître directement l'intensité du courant, en « ampères. »

Ampère a reconnu que l'action exercée par un courant sur une aiguille aimantée est proportionnelle à l'intensité telle que nous venons de la définir. Mais elle dépend aussi des propriétés de l'aimant, et la graduation théorique en « ampères » est plus compliquée pour les galvanomètres, dans lesquels on utilise cette action sur l'aiguille aimantée, que pour les balances électrodynamiques.

Pour obtenir malgré l'action directrice de la terre sur l'aiguille aimantée, des instruments à indications fixes, quelle que soit leur orientation, on

⁽¹⁾ On retrouvera dans toutes les formules le facteur $g, 81$, (l'intensité de la pesanteur) parce que, s'écartant des conventions du système métrique, on a pris le kilogramme pour unité de masse.

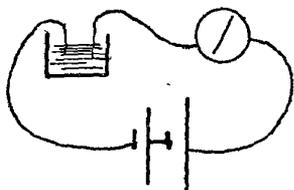
place dans la boîte de l'instrument un très fort aimant fixe, qui dirige la petite aiguille aimantée mobile; le passage du courant la dévie.



On vend aussi de pareils instruments tout gradués, mais il ne faut pas oublier que l'exactitude de la graduation dépend de la force de l'aimant fixe, et que celle-ci diminue avec le temps, et peut même

subir de grands changements brusques si on l'approche d'une forte machine Gramme. Tous ces instruments s'appellent des « Ampères-mètres. »

Faraday a reconnu que le poids de l'hydrogène dégagé en une seconde dans la décomposition de l'eau par le courant électrique, le poids de cuivre ou d'argent déposé dans la décomposition du sulfate de cuivre ou de l'azotate d'argent dissous dans l'eau, est proportionnel à l'intensité du courant. Cela fournit la méthode de contrôle la plus simple d'un ampèremètre. Un courant qui traverse successivement l'ampèremètre et la dissolution, doit indiquer autant d'« ampères » qu'il



produit de fois 0,014 milligrammes d'hydrogène, ou 1,12 milligrammes d'argent, pendant chaque seconde

Loi de Joule. - Le passage d'un courant à travers

un fil produit une quantité de chaleur proportionnelle au carré de l'intensité I et à la durée t du passage du courant, comme l'a montré Joule en mettant le fil dans un calorimètre rempli non pas d'eau mais d'un liquide isolant (alcool ou pétrole, par exemple). Cette quantité de chaleur est en outre proportionnelle à la longueur l du fil, en raison inverse de la surface de sa section droite s , et proportionnelle à un coefficient qui dépend de la nature du fil. On appelle résistance électrique spécifique r de la matière du fil, ce dernier coefficient, et simplement résistance du fil R , le produit de ce dernier coefficient par la longueur du fil et l'inverse de la section droite

$$R = r \frac{l}{s},$$

On est convenu de mesurer R , au moyen d'une unité appelée « ohm » telle que

$$\frac{R I^2 t}{9,81}$$

représente un nombre de kilogrammètres équivalents (v. p. 23) au nombre de calories produites, t étant exprimé en secondes, et I en ampères. On a réalisé matériellement une résistance égale à un « ohm », et on peut soit l'acheter chez un constructeur, soit la reproduire soi-même.

Les expériences de nombreux physiciens ont en effet montré que un ohm est la résistance d'un fil de mercure contenu dans un tube de verre de 1 millimètre et de 1,06 mètre de longueur.

Des dissolutions salines dans lesquelles sont

plongées deux fils du métal dissous se comportent comme les fils métalliques ; mais leur résistance spécifique est beaucoup plus grande que celle des métaux.

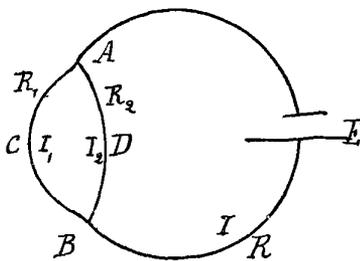
Résistance d'un fil d'un mètre de long et d'un millimètre carré de section.

Cuivre pur	$0,016^{ohms}$
Solution concentrée de sulfate de cuivre	$300.ohms$
<hr/>	
zinc	$280.ohms$

Force électromotrice des piles. - L'intensité du courant fourni par une pile dans un circuit conducteur dépend des dimensions et de la nature de celui-ci. Cette influence s'exprime complètement au moyen de la résistance ci-dessus définie. Si l'on mesure la résistance de chacune des parties qui forment le circuit, y compris les liquides de la pile, et si on multiplie la somme de ces résistances par l'intensité, on trouve que ce produit reste le même pour une même pile, quand on change le circuit. (Ohm - Pouillet). Cette valeur constante du produit, porte le nom de force électromotrice de la pile ; elle est mesurée en « volts » quand on mesure l'intensité en « ampères » et la résistance en « ohms ». Le produit de la force électromotrice E par l'intensité I , égal à RI^2 , représente la chaleur totale produite dans les fils par suite de la loi de Joule ; $\frac{EI}{9.81}$ mesure en kilogrammètres par seconde le travail que produit la pile quand l'intensité du courant qui la traverse est I .

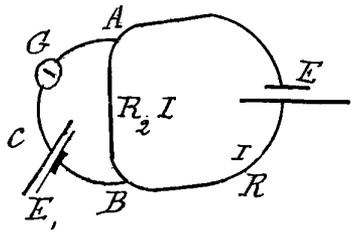
Quand plusieurs piles sont attachées bout à bout, on obtient la force électromotrice totale, en ajoutant les forces électromotrices de toutes les piles qui, prises isolément, produiraient un courant de même sens que le courant effectif, et retranchant les autres. - Deux piles formées des mêmes matières mais de forme et de dimensions différentes ont même force électromotrice; car mises en opposition dans un circuit qui contient un galvanomètre, elles ne produisent aucune déviation.

Ce rôle de la résistance nous montre que pour mesurer l'intensité du courant, sans la diminuer sensiblement par son introduction dans le circuit, un ampèremètre doit avoir une résistance aussi petite que possible; par conséquent sa bobine doit être formée d'un très petit nombre de tours de fil très gros.



Courants divisés. - Deux points A B d'un circuit sont réunis par deux fils différents. La force électromotrice de la pile qui produirait dans les fils ACB, ADB, les courants qu'on y observe serait évidemment la même; le produit $R_1 I_1$ pour le fil ACB doit donc être égal au produit $R_2 I_2$ pour le fil ADB, ce que l'expérience confirme. D'ailleurs l'intensité totale I dans le fil BEA est la somme $I_1 + I_2$ des intensités dans les fils ACB, ADB. - Si le fil ACB contient une pile de force électromotrice E , capable de produire un courant de même sens que I , c'est $R_1 I_1 + E$, qui est égal à $R_2 I_2$.

Voltmètre.— Un galvanomètre, construit dans la partie magnétique comme l'ampèremètre, mais dont la bobine est formée d'une très grande longueur de fil très fin, placé en ACB , mesure par sa déviation la force électromotrice entre les points AB , sans changer sensiblement l'intensité du courant dans le fil ADB , car la résistance R_1 étant très grande par rapport à R_2 , l'intensité I_1 est très petite par rapport à I_2 . On peut le graduer directement en « volts ».



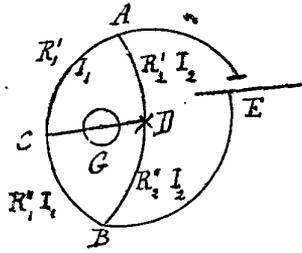
Comparaison des forces électromotrices.— Dans ce fil ACB , mettons une pile en opposition avec la pile principale E , et un galvanomètre. Réglons la résistance R_2 comprise entre A et B sur le deuxième fil ADB , de manière que l'aiguille du galvanomètre reste au zéro; I_1 est nul, E_1 est égal à $R_2 I_2$, E est égal à $(R + R_2) I_2$ en appelant R la résistance de la pile E' et des fils qui la réunissent aux points A et B . Le rapport de E_1 à E est donc égal au rapport $1 + \frac{R_2}{R}$ des résistances. Enfin, si la pile E est large et plate, sa résistance intérieure est très faible, si les fils de jonction sont longs et très fins, et valent plusieurs centaines d'ohms, il suffit de tenir compte de ceux-ci dans l'évaluation de R , sans se préoccuper de ce qui dépend de la pile.

Forces électromotrices

Élément Daniell à solutions saturées	} environ	1 volt
(+) Cuivre, Sulfate de cuivre, Sulfate de Zinc, Zinc (-)		
Élément Leclanché (au début)		1,5
Pile au bichromate de potasse		1,7 à 1,9
Pile Bunsen		1,8 à 1,9

Comparaison des résistances. - Pont ou balance de Wheatstone.

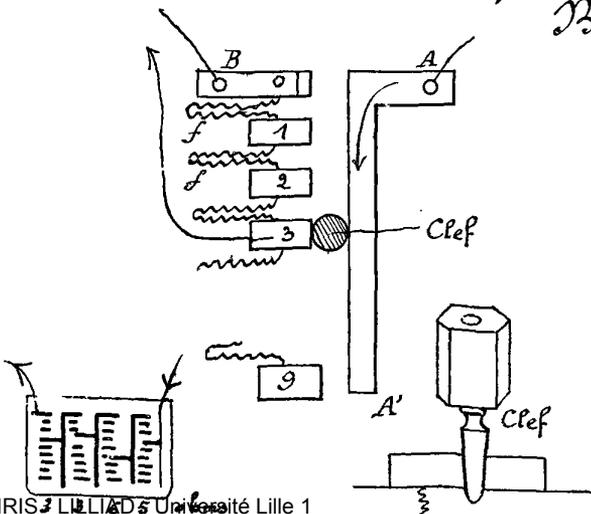
Sur les deux fils ACB, ADB , réunissons deux points C, D par un galvanomètre G , et déplaçons l'un de ces points D , jusqu'à ce que le galvanomètre reste au zéro. Le courant I_1 dans AC se continue en CB sans changement; de même I_2 en AD puis DB .



La force électromotrice nécessaire pour produire le courant I_1 dans AC et le courant I_2 dans AD est la même, puisqu'on pourrait confondre les points C et D sans rien changer. $R_1' I_1$ est donc égal à $R_2' I_2$ et de même $R_1'' I_1$ à $R_2'' I_2$. Ces deux égalités montrent $\frac{R_1'}{R_2'}$ est égal à $\frac{R_1''}{R_2''}$. Si donc on connaît trois des résistances, R_2', R_1'', R_2'' , le quatrième R_1' est donnée, quand le galvanomètre reste au zéro par

$$R_1' = \frac{R_2'}{R_2''} R_1''$$

N.B. - On remarquera que dans ces deux méthodes, le galvanomètre ne sert pas à mesurer un courant, mais seulement à reconnaître qu'il n'y a pas de courant dans un certain fil; il suffit qu'il soit sensible.



IRIS 2 LILLIAD 5 Université Lille 1
Dessus de la boîte

Boîtes de résistances. - Pour la pratique des mesures, on emploie des boîtes de résistances dont les plus commodes sont les boîtes à décades. - Le couvercle en caoutchouc durci (isolant) de la boîte est sillonné de grosses tiges de laiton auxquelles

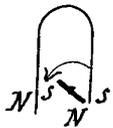
on peut attacher les fils conducteurs par des vis de pression A, B. Dans la boîte se trouvent des bobines de même résistance allant de la tige 0 à la tige 1, de la tige 1 à la tige 2, etc. jusqu'à 9. Entre la barre AA' et la tige 3, mettons un coin métallique ou « clef », le courant passe de AA' à 3, puis traverse 3 bobines égales 3 ohms avant d'arriver à B. - D'autres bandes parallèles sont formées de 9 bobines de 10 ohms, 9 bobines de 100 ohms, et 9 bobines de 1000 ohms, ce qui permet de former une résistance quelconque comprise entre 1 et 9999 ohms.

La fabrication de résistances égales entre elles est d'ailleurs très facile. On prend trois bouts de fil quelconques pour former les résistances R_1'' , R_2' , R_2'' ; puis on choisit un fil R_1' qui équilibre le « pont ».

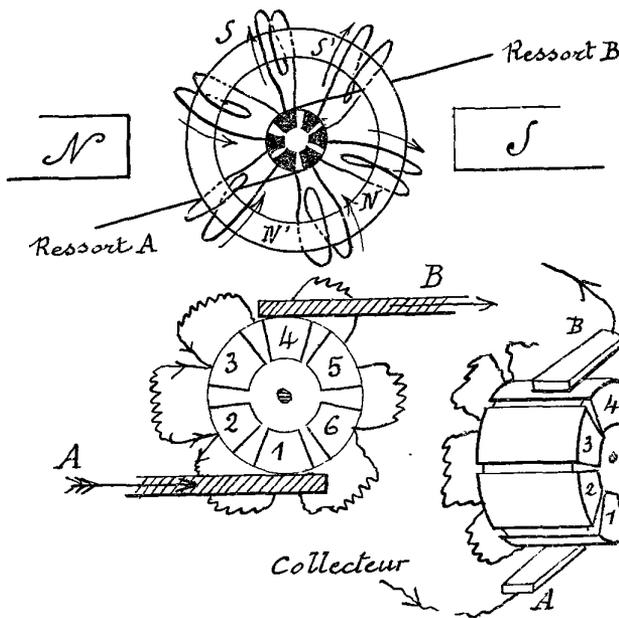
On l'enlève et on en cherche un second qui produise le même effet, sa résistance est aussi R_1' ; etc.....

Moteurs électromagnétiques. - Moteur Gramme. Aimants et électro-aimants.

On peut faire tourner toujours dans le même sens, un électro-aimant mobile près d'un aimant fixe, à condition de renverser le sens du courant dans l'électro-aimant à chaque demi-tour, lorsqu'il arrive dans sa position d'équilibre stable, et de changer à ce moment les attractions en répulsions. On obtient un mouvement plus régulier, une force motrice moins variable en construisant l'électro-aimant comme l'a montré Gramme. Le noyau de l'électro-aimant



est un anneau de fil de fer fermé, dans lequel on fait



naitre des pôles magnétiques en deux points diamétralement opposés. Pour cela, l'anneau de fer est entouré de fil enroulé dans le même sens d'un bout à l'autre. Mais ce fil est divisé en sections nombreuses; (on en a figuré 6 seulement); après avoir

fait plusieurs tours (deux sur le dessin) le fil est rattaché à un secteur métallique, encastré dans une matière isolante, et on continue à l'enrouler par sections du même nombre de tours de fils. L'ensemble de ces secteurs métalliques 1, 2, 3, 4, 5, 6, isolés les uns des autres, forme un cylindre appelé collecteur, centré sur l'axe de rotation o , qui porte toute la bobine, et tourne avec elle. Deux ressorts ou balais A, B , fixés sur le support sont liés au zinc et au cuivre de la pile qui fournit le courant; ils appuient sur des secteurs qui sont toujours diamétralement opposés (1 et 4) le courant qui arrive par A , se divise en deux dans la bobine, il parcourt l'une des moitiés (1, 2, 3, 4) dans un sens, et l'autre moitié (1, 6, 5, 4) en sens inverse, il y a donc un pôle (N) entre les deux bobines qui aboutissent au secteur (1) et un pôle (S) entre les deux bobines qui aboutissent

au secteur (4). - L'électro-aimant annulaire se met à tourner, surtout si le diamètre NS est à peu près perpendiculaire à la ligne NS des pôles de l'aimant fixe. Après un dixième de tour, les secteurs (1) et (4) abandonnent les balais A, B , et sont remplacés par les secteurs suivants (2) (5). Cela renverse le sens du courant dans les fils qui allaient du secteur 1 au secteur 2, et du secteur 4 au secteur 5. Les pôles N et S , disparaissent, et c'est entre les bobines qui aboutissent à 2 qu'apparaît le pôle N' , et le pôle S' entre celles qui aboutissent à 5. - Comme l'anneau a tourné d'un dixième de tour, ces pôles $N'S'$, sont par rapport à l'aimant fixe NS dans la position qu'occupaient N, S , au début de la description.

Avec cette disposition, les pôles mobiles restent dans un petit espace ($\frac{1}{6}$ de circonférence) où la force qui les entraîne est à peu près constante; le mouvement est bien plus régulier que dans les moteurs où chaque pôle parcourt toute une demie circonférence et se renverse ensuite.

Prix du champ magnétique. - L'anneau se meut dans un espace (champ magnétique) où l'aimant NS produit des forces magnétiques. Malheureusement il faut beaucoup d'acier trempé, c'est-à-dire du poids et de l'encombrement, pour obtenir d'assez grandes forces magnétiques. - On peut en obtenir de beaucoup plus grandes, - et par conséquent avoir un moteur plus puissant, pour le même anneau mobile - en remplaçant l'aimant permanent d'acier NS , par un

électro-aimant à fort noyau de fonte ou de fer-doux entouré par un fil conducteur que parcourt le courant de la pile. - L'entretien de ce courant est accompagné d'une dépense de travail sous forme de chaleur, conformément à la loi de Joule; pour un même champ magnétique produit, avec le même noyau de fer et même forme de la bobine la dépense de travail est la même soit avec un petit nombre de circonvolutions d'un gros fil conducteur parcouru par un courant intense, soit avec un grand nombre de circonvolutions d'un fil fin parcouru par un faible courant. C'est cette dépense de travail évaluée en kilogrammètres (et donc la valeur en francs dépend du prix du kilogrammètre suivant les lieux et les moteurs mécaniques) qu'on appelle le prix du champ magnétique pour la forme et les dimensions de l'électro-aimant employé. Ce prix est assez faible pour qu'on ait trouvé presque partout avantage à abandonner les aimants permanents, malgré l'absence de dépense d'entretien du champ magnétique qu'ils produisent.

Induction magnétique. - Loi de Lenz découverte par Faraday (1831). - Étudiée par Lenz (1832). - Quand on déplace par rapport à un aimant une bobine reliée à un galvanomètre, l'aiguille du galvanomètre est déviée. - il se produit un courant qui s'oppose au déplacement de la bobine. Pour un même déplacement, quand on ajoute entre la bobine et le galvanomètre des fils de plus en plus longs, l'impulsion de l'aiguille du galvanomètre devient de plus en plus petite; mais le produit de l'angle d'impulsion par la somme

de toutes les résistances (bobine galvanomètre et fils de jonction) reste constant. C'est donc une force électromotrice (et non une intensité de courant) qui est produite par un déplacement relatif à vitesse déterminée d'un aimant et d'une bobine données.

Machine Gramme.- Dans la machine Gramme à aimant permanent, le passage du courant d'une pile produit un mouvement de rotation bien régulier; enlevons la pile, et faisons tourner dans le même sens à la main ou par un moteur nous produisons un courant inverse du premier et à peu près constante pour une vitesse de rotation déterminée, la force électromotrice est indépendante de la résistance intérieure. [mesure par RI ; par opposition avec des piles]. Pour un même anneau la force électromotrice est proportionnelle à la vitesse; enfin pour des anneaux différents, enroulés les uns avec un petit nombre de tours de gros fil, les autres avec un grand nombre de tours de fil fin, la force électromotrice est proportionnelle au nombre de tours de fil sur l'anneau.

Quand la machine est mise en mouvement par le courant d'une pile, la force électromotrice s'oppose à celle de la pile, on voit en effet le courant diminuer quand après avoir arrêté la machine, on la laisse tourner librement. Il en est de même quand on emploie deux machines pour la transmission du travail. L'une des machines, mise en mouvement par une turbine ou un moteur à vapeur, produit une force électromotrice E et absorbe $\frac{EI}{9,81}$ kilogrammètres par seconde, quand le courant a une intensité I . Ce courant produit dans les conducteurs de résistance R une quantité de chaleur dont l'équivalent en travail

est $\frac{RI^2}{9,81}$ kilogrammètres par seconde, et le reste $\frac{EI - RI^2}{9,81}$ ou $\frac{E'I}{9,81}$ est le travail qu'absorbe la seconde machine de force électromotrice inverse E' pour le transmettre par sa poulie aux outils qu'elle doit mouvoir.

Le rendement électrique de la transmission, rapport du travail que l'anneau de la seconde machine transmet à son axe de rotation, au travail que l'anneau de la première a reçu de son axe de rotation est donc $\frac{E'I}{EI}$ ou $1 - \frac{RI}{E}$.

La force électromotrice E' qui dépend de la vitesse de la 2.^e machine, est en relation avec le travail qu'on lui demande; et varie avec celui-ci; il en est de même de l'intensité I égale à $\frac{E - E'}{R}$.

Pour obtenir un rendement déterminé 0,8 par exemple, avec une machine de force électromotrice E et un travail transmis par seconde $\frac{E'I}{9,81} = \frac{0,8 EI}{9,81} = \mathcal{C}$; on voit qu'il faut prendre une intensité de courant I égale à $\frac{9,81}{0,8} \frac{\mathcal{C}}{E}$, et une résistance égale à $(1 - 0,8) \frac{E}{I}$, ou $0,2 \frac{0,8}{9,81} \frac{E^2}{\mathcal{C}}$. Cette résistance se compose de la somme des résistances des deux machines, et de la résistance des fils de transmission, et si la résistance des deux machines est inférieure à $0,2 \frac{0,8}{9,81} \frac{E^2}{\mathcal{C}}$, on pourra toujours, quelle que soit la distance, trouver quelle section il faudrait donner aux fils de communication pour obtenir le rendement désiré. Cette section croît très vite avec la distance de transmission, et le poids de cuivre à employer en fil de communication pourrait devenir tel que l'amortissement du prix de premier établissement dépasse le prix de revient du travail \mathcal{C} par machine à vapeur sur place. Toutefois nous pouvons réduire la grosseur de ces fils et

les prendre plus résistants, à condition d'augmenter la force électromotrice des machines et revenir à des conditions commercialement acceptables. Il n'y aura d'autres limites que celles imposées par les dangers que présentent les grandes forces électromotrices associées à de fortes intensités de courant, et par les grandes difficultés d'isolement qui rendront plus coûteuse la construction des machines, et l'installation du fil de ligne.

Exemple Hillairet - 1889.

Travail fourni à la 1^{re} machine 22000 kilogrammètres par seconde. 300 chevaux - vapeur.

Ligne : 5 kilomètres - fil de cuivre 50 millimètres carrés de section. - résistance 3 ohms 47. - intensité maximum 70 ampères.

Machine productrice du courant, résistance interne 1 ohm, 93.
 ——— réceptrice ——— ——— ——— 1 —, 42

Force électromotrice maximum 2850 volts.

Rendement électrique 0,83.

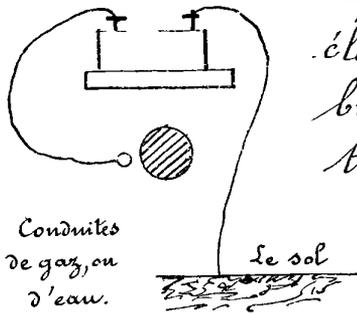
Rendement mécanique 0,65, moindre que le rendement électrique, par suite des frottements des axes sur leurs coussinets, et des organes mécaniques, depuis le moteur à vapeur jusqu'à l'anneau de la 1^{re} machine, et depuis l'anneau de la 2^e machine jusqu'aux courroies de transmission.

Courants induits par variation d'intensité sans déplacement - On obtient les mêmes effets d'induction en déplaçant une bobine par rapport à un électro-aimant que par rapport à un aimant d'acier, ou encore, en supprimant le courant dans l'électro-aimant sans rien déplacer, qu'en emportant l'électro-aimant très loin.

Transformateur. - Pour la production de lumière électrique, soit par l'arc, jaillissant entre deux charbons, soit par l'incandescence d'un filament de charbon dans une boule de verre bien vidée d'air, on peut se servir de machines de construction plus simple que la machine Gramme, donnant des courants qui se renversent un grand nombre de fois par seconde. L'usage de ces machines avec des transformateurs permet de placer l'usine dans la banlieue, d'y employer des forces électromotrices très grandes, contre lesquelles les ouvriers expérimentés savent prendre les précautions nécessaires, de transmettre par des fils pas trop gros, ce courant jusqu'à des stations de quartier, où il passe dans la bobine inductrice à fil fin d'un transformateur à noyau de fer doux. La bobine induite à gros fil, faisant un petit nombre de tours autour du noyau de fer, est parcourue par des courants intenses, de force électromotrice assez faible pour être sans danger, qui se renversent chaque fois que le courant inducteur cesse de croître ou de décroître, c'est-à-dire à chaque alternative de celui-ci. C'est ce courant que l'on distribue au consommateur.

Principe de la bobine de Ruhmkorff. - Inégalité des forces électromotrices induites à la rupture et à la fermeture du courant inducteur. On peut rendre la rupture du courant inducteur extrêmement courte, et par suite la force électromotrice induite assez grande pour provoquer le passage d'une étincelle dans l'air entre les deux bouts du fil induit, soit 30.000 à 40.000 volts par centimètre de longueur d'étincelle. Au contraire, l'établissement du courant, à partir du moment où le circuit est fermé,

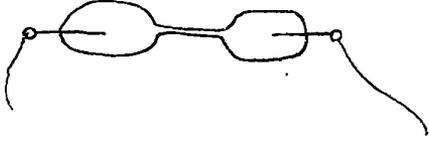
se fait conformément aux lois des courants variables. d'autant plus lentement que la bobine contient plus de fer, et peut exiger plusieurs dixièmes de seconde ou même plusieurs secondes dans les grosses bobines; de là résulte que la force électromotrice induite à la fermeture est toujours faible, et ne peut donner que de très courtes étincelles. - Cette dissymétrie peut être utilisée pour charger d'électricité un corps conducteur isolé; on met un des bouts du fil induit en communication avec les conduites d'eau ou de gaz. - L'autre bout du fil en communication avec une boule de cuivre supportée par un pied isolant, près de laquelle on place la sphère qu'on veut électriser. On fait marcher le trembleur de la bobine; à chaque rupture du courant induit, une étincelle jaillit entre la boule et la sphère, et en même temps une certaine quantité d'électricité passe à celle-ci, et la charge. Il ne passe rien au moment de la fermeture du circuit.



Etincelles. - La longueur de l'étincelle croît d'abord proportionnellement à la force électromotrice qu'elle produit, puis beaucoup plus vite que celle-ci; les longs éclairs n'exigent peut-être pas beaucoup plus d'un million de volts.

Lueurs dans les tubes de Geissler. - Sous une pression de 4 ou 5 millimètres de mercure, l'air et les gaz laissent passer facilement le courant électrique et deviennent lumineux par ce passage. Ils se comportent

a peu près comme des corps conducteurs. On peut d'ailleurs provoquer ces lueurs soit par le passage du courant entre deux fils de métal soudés dans le verre ; soit par des phénomènes d'induction directe, soit par influence électrostatique en déplaçant un bâton de caoutchouc électrisé près du tube.



Rappel des phénomènes d'influence électrostatique. - Phénomènes d'influence dans l'atmosphère. - De longs conducteurs verticaux se montrent électrisés positivement en bas, négativement en haut et montrent que la terre est presque toujours électrisée négativement.

Electrisation des nuages par influence sur leurs deux faces supérieure et inférieure. Eclairs entre deux couches superposées ; les nuages inférieurs restent positifs, les supérieurs négatifs. - Electrisation négative par contact direct des nuages qui se forment sur le flanc des montagnes. - Orages.

Aurores boréales. - Ces immenses lueurs se produisent aux deux pôles terrestres, à des hauteurs où la pression est faible comme dans les tubes Geissler - généralement supérieures à 30 ou 40 Kilomètres. Les régions qu'elles illuminent, où la direction de l'aiguille aimantée se rapproche de la verticale, semble indiquer que ces aurores sont dues à de grands courants électriques induits produits dans les couches supérieures de l'atmosphère lorsque ces couches se déplacent très rapidement par rapport à la terre. A ce titre l'observation de la forme et de l'éclat des lueurs, renseignant sur la vitesse du mouvement de l'air,

pourra acquies une grande importance météorologique. Les perturbations magnétiques qui les accompagnent et qui se font sentir jusque dans nos régions, nous permettent d'affirmer la nature électrique de ces lieux. on conçoit que l'étude de la distribution géographique de chaque perturbation magnétique permette de remonter à la forme et à l'étendue des courants induits qui l'ont produite, c'est-à-dire de reconstituer l'aurore boréale, sans l'avoir vue, - puis de déduire de ces courants induits la grandeur et l'orientation des mouvements aériens auxquels ils sont dus. On voit comment l'étude des mouvements de l'aiguille aimantée pourra - (à l'aide de cartes magnétiques d'années - quand les observatoires magnétiques seront assez nombreux, renseigner sur les grands mouvements des couches supérieures de l'atmosphère, qui ne sont rendues visibles par aucun nuage.

Fin.

Conférences de M. Raveau.

Description des instruments météorologiques - (Duclaux - et Amyot, instructions météorologiques).

Description des piles - réglage et emploi du galvanomètre de Nobili. - Lois de l'électrolyse.

Errata

- p.3 ligne 14 à la suite de prisme, ajouter droit.
- p.3 — 19 au lieu de comp... mettre comptée.
- p.3 — 22 au lieu de premiers mettre pressions
- p.3 — 24 dans la formule rétablir la ligne + entre $f_A - f_B$ et $P \frac{ab}{AB}$
 figure effacer le trait --- qui va de B, au sommet caché du parallélogramme. - Effacer la lettre a à droite de la ligne ac.
- p.5 ligne 5 au lieu de gaz écrire Gay.
- p.5 — 23 au lieu de n'est autre que écrire est proportionnel à
- p.6 — 1 après d Rx écrire 22,32 x 0,001293.
- p.7 — 1 au lieu de au écrire ou
- " — 9 au lieu de Fromène écrire Formène.
- " — 14 au lieu de valeur écrire vapeur.
- " — 21 ——— effets ——— effet
- " — 22 ——— L'on ——— Si on...
- p.9 — 13 ——— V_t ——— v_t
- p.10 — 1 ——— (p.9) ——— (p.8 et 10)
- p.11 — 3 mettre comprimé à 300 atmosphères, entre deux virgules,
- " — 7 — " — une virgule entre méthyle, et CO^2 .
- p.13 — 8 au lieu de $(st \frac{P}{E s})$ écrire $(1 + \frac{P}{E s})$
- " — 18 ——— longueur a écrire largeur a.
- p.14 — 7 ——— pil écrire pile.
- " — 25 effacer) après 3.1415g. -
- " — dernière ligne .. au lieu de $C = N \frac{\theta}{l} R^4$ écrire $C = N \frac{\theta}{l} \frac{\pi}{2} R^4$.
- p.15 — 22 au lieu de Principes écrire Principe.
- p.17 — 13-14 effacer les accolades.
- " — 24 au lieu de secourables écrire mesurables.
- p.18 — 13 ——— Expériences ——— Expérience.

p. 18	ligne 25	au lieu de	à air	écrire	à l'air.
p. 19	5	_____	606,5	_____	0,705t écrire 606,5 - 0,705t.
"	9	_____	Leslie	écrire	Leslie.
p. 20	16, 17	_____	C_p, C_v	_____	C_p, C_v
et 21, 22		_____	"	_____	"
p. 21	15	_____	Pour les	_____	Pour le
"	18	_____	On	_____	on
p. 22	1	_____	des rapports	_____	du rapport
"	12	_____	p_1	_____	p_2
p. 26	13	_____	Les	_____	Ces
p. 29	16	_____	Hygrométrie	_____	Hygromètre
"	17	_____	Principes	_____	Principe
p. 30	26	_____	...titrées par.	_____	...titrées, par...
p. 38	2	_____	la	_____	pour la
"	4	_____	lequel	_____	laquelle
p. 39	24	_____	sommet ménisque	_____	sommet du ménisque
"	25	_____	due	_____	du
p. 40	11	_____	table	_____	sable
"	16	_____	plus rapide	_____	le plus rapide
p. 43	14	_____	les qui	_____	les lettres qui
p. 44	12	_____	$1 + 0,0367t$	_____	$1 + 0,337t$
"	20	_____	d' environ	_____	environ
p. 45	1	_____	p.	_____	p. 32
"	21	_____	nuls	_____	calmes
p. 46	2	_____	sont	_____	vont
p. 47	dernière	_____	feuilletés	_____	feuilles
p. 48	3	_____	d'un transport	_____	de transport
p. 51	23	_____	tons	_____	sous
p. 53	11	_____	p^2	_____	p_2
p. 54	3	_____	(p.)	_____	(p. 22)

p. 54	ligne 22	au lieu de	(p..)	écrire	(p. 24)
p. 57	— 29	_____	critique	_____	cinétique
p. 61	— 15	_____	pour	_____	par
"	— 22	_____	celui	_____	celui-ci
p. 64	— 3	_____	claire	_____	solaire
"	— 9	_____	sur les sels	_____	d'action chimique sur les sels
p. 66	— 28	_____	incandescente	_____	incandescent
p. 67	— 6	_____	Les verres	_____	Les serres
p. 72	— 5	en remontant	de rôle	_____	Le rôle
p. 73	— 8	_____	0,05	_____	0,05
"	— 22	_____	intérieures	_____	inférieures
p. 76	— 3	_____	suivre	_____	fournir
p. 77	— 27	_____	de reconnaître	_____	permet de reconnaître.
p. 80	— 26	_____	augmenté	_____	augmentée
p. 81	— 7	_____	sa différence	_____	la différence
p. 83	— 1	_____	colorié	_____	colorée
p. 85	— 9	depuis	- Dans le cas ... tout devrait être en petits caractères jusqu'à page 86 ligne 2. - On a.....		
p. 85	— 17	au lieu de	PS x v, t	écrire	PS x v t
p. 85	— 18	_____	S, S'	_____	S, S'
p. 89	— 1	_____	qui la forme	_____	qui le forme
"	— 20	_____	accidents	_____	accidentés
p. 90	— 2	_____	courbes	_____	couches
p. 93	— get 10	_____	est près	_____	se rapproche
p. 94	— 21	_____	golf	_____	gulf
"	— 26	_____	suite	_____	sauté
p. 100	— 23	_____	après atmosphère mettre la vitesse est doucement		
"	— 27	au lieu de	[v ² + 2g(H - H')] mettre [v ² + 2g(H ₀ - H')]		
"	— 29	_____	$\left(\frac{H - v_0^2 r^2}{2g} - \frac{v_0^2 r_0^2}{2g} \right) \text{ --- } \left(\frac{H + v_0^2}{2g} \right) \frac{1}{2} = \frac{v_0^2}{2g} r_0^2$		
p. 101	— 13	_____	centimètre	_____	centimètres

p.103 ligne 17 au lieu de observation écrire l'observation.

p.105 — 21 ————— projetée ————— projeté

p.106 — 2 ————— Weyber ————— Weyber

" — 8 ————— ces ————— des

note (1)

p.107 — II après surface ajouter, Sont alors en contact par une surface

" — II au lieu de mille ou dix mettre mille ou dix mille:

p.110 — 19 ————— et les minimums, effacer les et s.

p.116 — 28 ————— après millimètre ajouter carré de section.

p.117 — 1 au lieu de plongée mettre plongés

" — 7 ————— concentré ————— concentrée

" — 25 ————— après produite ajouter en une seconde

p.118 — 11 au lieu de Ce mettre Le

" — 25 ————— $R_1 R_2$ ————— $R_2 I_2$

p.119 — 1 ————— dans ————— pour

" — 20 ————— $\frac{R_2}{R}$ ————— $\frac{R}{R_2}$

p.120 — 12 ————— après montrent mettre que $\frac{R_1}{R_2}, \dots, \frac{R_1''}{R_2''}$

p.123 — 12 au lieu de dixième ————— sixième

p.124 — 22 ————— 1832 ————— 1834

p.125 — 11 ————— après et ajouter d'intensité

p.130 — 25 au lieu de semble mettre semblent

p.131 — 21 ————— Amyot ————— Augot
