

RECHERCHES

THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES

SUR L'ÉLECTRICITÉ

CONSIDÉRÉE AU POINT DE VUE MÉCANIQUE

PAR

MARIÉ DAVY

Docteur en médecine, docteur ès sciences,
Ancien professeur à la Faculté des sciences de Montpellier,
Professeur au Lycée Bonaparte de Paris.

PARIS

VICTOR MASSON ~~ET FILS~~

PLACE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE

1861

RECHERCHES
THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES
SUR L'ÉLECTRICITÉ
CONSIDÉRÉE AU POINT DE VUE MÉCANIQUE.

Paris. — Imprimerie de L. MARTINET, rue Mignon, 2.

RECHERCHES
THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES
SUR L'ÉLECTRICITÉ

CONSIDÉRÉE AU POINT DE VUE MÉCANIQUE

PAR

MARIÉ DAVY

Docteur en médecine, docteur ès sciences,
Ancien professeur à la Faculté des sciences de Montpellier,
Professeur au Lycée Bonaparte de Paris.

PARIS
VICTOR MASSON ET FILS

PLACE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE

1861

INTRODUCTION.

Les usages de l'électricité sont déjà nombreux, et tout nous fait espérer qu'ils se multiplieront encore à mesure que la science et l'industrie feront de nouveaux progrès.

Dans les conditions si diverses où il manifeste son action, cet agent doit-il conserver un rôle à part, des règles spéciales, ou doit-il rentrer dans le domaine de la mécanique générale ?

On voit se généraliser parmi les physiciens la pensée que la lumière et la chaleur ne sont que de la puissance vive, du mouvement établi dans un milieu qu'on appelle l'*éther*, et pouvant se transmettre sous certaines conditions à la matière pondérable et s'y transformer en travail mécanique utilisable; que du travail mécanique, à son tour, peut reparaître dans les corps sous forme de puissance vive, de chaleur et de lumière.

Sans doute nous n'avons pas encore la clef de ces transformations successives; mais l'esprit de recherche, si puissant aujourd'hui, est en éveil, et la solution viendra tôt ou tard. Déjà des essais très remarquables ont été faits dans cette voie; mais au milieu de l'obscurité qui nous environne sur ce point, on conçoit que les pas soient mal assurés, et que, chacun se laissant aller à la pente naturelle de son esprit, les théories les plus divergentes soient mises en avant. Les uns, en effet, prennent pour point

de départ de leurs spéculations l'attraction newtonienne, qu'ils adoptent sans réserve et qu'ils considèrent comme une des propriétés essentielles de la matière ; d'autres, au contraire, et je suis de ce nombre, acceptant cette attraction comme l'expression d'un fait, n'y voient qu'une hypothèse imposante par sa grandeur et sa simplicité, mais très loin d'être le dernier mot de la science.

L'hypothèse de Newton, si belle par sa simplicité même, a rendu à la science d'immenses services ; quelques physiciens en sont venus cependant à se demander aujourd'hui si l'attraction est bien réellement une force primitive, élémentaire, ou bien si elle ne serait pas elle-même une résultante d'autres forces ou inconnues ou à peine entrevues. Les lois de Newton, expression des données de l'observation, ne sauraient être mises en cause ; mais Newton n'a jamais dit « les corps s'attirent » ; il répétait seulement « les corps se comportent comme s'ils s'attiraient ».

Cette idée d'une action à distance, sans intermédiaire, répugne à certains esprits ; mais, de même que l'analyse a pu seule conduire Newton à formuler son admirable hypothèse, l'analyse seule pourrait aujourd'hui lui en substituer une autre. Essayer de remplacer l'attraction directe de la matière par des influences électriques, alors que l'on n'a sur l'électricité que les notions les plus vagues et les plus confuses, serait se livrer à de simples jeux de l'esprit sans utilité pour la science. Que l'on dise que les corps s'attirent parce qu'ils contiennent de l'électricité, ou que l'on dise simplement qu'ils s'attirent, la difficulté reste la même, et, loin de gagner au change, on ne fait qu'ajouter une inconnue à une autre.

Mais si l'on venait à démontrer la possibilité analytique que l'état vibratoire de l'éther constitue dans ce milieu un état de tension inégalement répartie entre les molécules des corps, entre ces corps eux-mêmes et l'espace ambiant, le travail de la pesanteur pourrait n'être considéré lui-même que comme une transformation de puissance vive, et les effets mécaniques de la pesanteur, de la lumière, de la chaleur, de l'électricité et du magnétisme, se trouveraient rattachés à une seule et même hypothèse.

Ce ne sont pas des considérations vagues et sans corps qui peuvent conduire à un tel progrès, ce sont des formules précises pouvant se traduire en nombres ; ce sont des faits rigoureusement observés, des chiffres en dernière analyse, et quoi qu'on en puisse dire.

La science est encore loin d'en être arrivée à ce point.

Si donc, au début de la publication de mon travail, je me permets cette digression, c'est que plus d'une fois je me trouverai arrêté par cet obstacle infranchissable pour moi des actions électriques à distance et sans intermédiaire que les théories actuelles dénomment et transportent dans le langage de la science, mais qu'elles n'expliquent en aucune façon ; c'est que des analystes éminents font de ce point capital de la mécanique générale l'objet de leurs méditations, et que la science ne saurait mettre trop de soins à recueillir tous les matériaux qui, à un moment donné, pourraient être invoqués avec fruit.

Quoi qu'il en soit, les rapports intimes que l'expérience révèle chaque jour entre la chaleur, la lumière et l'électricité, sont incontestables et incontestés ; on ne saurait

done admettre de distinction fondamentale entre ces divers agents. L'analogie des effets appelle nécessairement l'analogie des hypothèses qui servent à les expliquer ou à les relier.

Si, comme on l'admit longtemps, comme de grands esprits l'admettent encore, la chaleur et la lumière sont constituées par deux fluides distincts lancés dans l'espace avec l'énorme vitesse de transmission de ces agents, l'électricité peut être rattachée à l'existence de deux fluides ayant leurs propriétés distinctes, quelles que soient les difficultés qui puissent naître de cette manière de voir pour expliquer les transformations de ces agents l'un dans l'autre. Mais si l'hypothèse des vibrations est au contraire la vraie, on est fatalement entraîné à l'étendre aux phénomènes électriques.

Je reconnais cependant qu'une hypothèse, quelque probable qu'elle soit, n'a conquis quelque autorité dans la science qu'alors qu'elle est non-seulement formulée d'une manière nette, mais encore que les faits généraux qu'elle embrasse s'en déduisent d'une manière claire et précise.

Je n'admettrai donc, pour le moment, aucune hypothèse, si ce n'est que l'électricité dynamique est constituée par du mouvement; que dès lors elle est soumise aux lois de la mécanique générale, modifiées, non dans leur essence, mais dans leurs déductions par la nature du mobile et du milieu dans lequel il se meut, inconnues sur lesquelles l'expérience seule peut nous fournir quelques renseignements.

Ce terrain limité sur lequel je me place, et duquel j'écarte la dualité des fluides électriques et jusqu'à l'exis-

tence d'un fluide électrique spécial, comme des hypothèses inutiles dès qu'elles ne sont pas nécessaires, exige une grande rigueur dans l'évaluation numérique des faits, et impose l'obligation de rattacher les mesures aux unités adoptées dans la mécanique ordinaire. C'est ce que je me suis efforcé de faire dans toutes mes recherches.

Lorsqu'une science d'observation en est à ses premiers pas, qu'elle est absorbée par la découverte des grands faits généraux qui doivent lui servir de fondement, la sagacité de l'observateur, son habileté à saisir et à prévoir les rapports des faits qui s'offrent à lui, contribuent souvent plus aux progrès de la science qu'une sévère critique des procédés d'expérimentation et une rigueur extrême dans les moyens de mesure.

Si Coulomb eût opéré dans les conditions où s'est placé M. Harris, où je me suis placé moi-même, il eût été fort empêché de reconnaître et de formuler la loi élémentaire de ces actions, et la science de l'électricité statique serait peut-être encore à faire. En s'arrêtant au contraire à l'aspect général du phénomène observé par lui, il a donné à Poisson la base de ses calculs sur l'électricité; et, par ceux-ci, il a été possible d'établir que les actions mutuelles des corps électrisés sont une conséquence de la loi élémentaire découverte par Coulomb, alors même que ces corps électrisés cessent de s'attirer ou de se repousser en raison inverse du carré des distances.

Mais depuis que la science électrique a pris plus complètement possession des faits généraux sur lesquels elle s'appuie, on a senti le besoin d'examiner ces faits d'une manière plus sévère, afin d'en dégager les rapports, de

faire apparaître les causes perturbatrices qui en altèrent la simplicité, et, par l'étude attentive de ces causes, d'arriver à pénétrer plus avant dans l'intimité des phénomènes observés et des lois qui les régissent.

On peut suivre pas à pas les signes de cette transformation graduelle dans les travaux qui se sont succédé sur l'électricité, et aujourd'hui on comprend plus que jamais la nécessité de remonter cette science, sous le rapport de la précision, au niveau de sciences plus parfaites, quoique moins étendues.

Si les physiciens n'avaient eu à leur disposition, dans l'étude des phénomènes de la chaleur, qu'un thermomètre à échelle arbitraire, sans points fixes, ils n'en auraient pas moins pu fixer les caractères généraux de cet agent, *comparer* les dilatabilités des corps, leurs capacités calorifiques, leurs chaleurs latentes, leurs pouvoirs conducteurs, les lois de leur refroidissement et réchauffement, les lois du rayonnement calorifique, etc. Mais il n'en est pas moins vrai qu'il en serait résulté une difficulté presque insurmontable pour relier et coordonner entre elles les observations dues aux nombreux et éminents physiciens qui se sont voués à l'étude de la chaleur ; que cette science aurait grandement perdu de sa netteté, de son homogénéité et de sa force, et que ses progrès ultérieurs eussent été fortement compromis.

Les mêmes causes produisent partout les mêmes effets.

Les boussoles ou galvanomètres, presque exclusivement employés dans les recherches sur l'électricité dynamique, ne sont en définitive que des instruments à échelle arbitraire ; aussi plus on cherche à approfondir l'élec-

tricité, plus on souffre des obstacles qu'y accumule l'absence d'une unité constante dans l'évaluation numérique des données si nombreuses qu'elle possède; plus on est sollicité à reprendre les observations déjà recueillies, sinon pour faire mieux que ce qui a été fait par d'éminents physiciens, du moins pour rattacher les résultats obtenus à une commune mesure, et mettre en évidence les causes des écarts que ces résultats présentent trop souvent entre eux. Ce besoin est bien plus impérieux encore au point de vue mécanique où je me suis placé dans mes recherches. Nous sommes ici en plein dans les phénomènes et les forces moléculaires. Les circonstances les plus insignifiantes ailleurs y acquièrent une importance exceptionnelle. Pour se reconnaître au milieu de la complication si grande de leurs manifestations, nous avons besoin de toutes les ressources de la science, et l'adoption d'unités conventionnelles, mais fixes, et aussi faciles à retrouver que le degré du thermomètre, est une force trop précieuse pour qu'on la néglige.

Il y a longtemps, du reste, que les physiciens ont senti tout le dommage qui résulte pour la science de l'absence d'unités généralement admises, et qu'ils ont proposé un accord entre eux sur ce point. Une des principales causes qui se sont opposées à l'adoption de cette utile mesure, c'est que l'on s'est exagéré trop souvent les difficultés que l'on éprouverait à rattacher à ces unités les indications des galvanomètres, qui sont encore, et avec raison, l'instrument favori des électriciens. Or, cette difficulté n'est un peu sérieuse que pour les courants d'une excessive faiblesse, à cause de la durée considérable qu'il faut donner

à l'expérience comparative. Dans ce cas même, la difficulté peut être aisément tournée.

La nature même de mon travail exigeait impérieusement un choix d'unités nettement définies, rigoureusement fixées et faciles à retrouver pour tous et en tout lieu. Sa principale valeur, en effet, réside dans les déterminations numériques sur lesquelles il s'appuie ; il faut donc que ces déterminations soient, sinon à l'abri de toute contestation, nul physicien n'y saurait prétendre d'une manière absolue, du moins accessibles au contrôle de tous. L'étude comparative et la graduation des appareils de mesure en fonction de mes unités devaient donc servir de point de départ à cet ouvrage.

RECHERCHES

THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES

SUR L'ÉLECTRICITÉ

CONSIDÉRÉE AU POINT DE VUE MÉCANIQUE.

PREMIER MÉMOIRE

De la mesure des courants électriques.

DÉFINITIONS.

En dehors de toute idée théorique sur la nature de l'électricité dynamique, j'appellerai avec tous les physiciens, *courant*, le mouvement particulier produit dans un conducteur qui réunit les deux pôles d'une pile ou les deux armatures d'un condensateur. J'admettrai également que ce *courant est dirigé dans la pile* du zinc au liquide dans lequel le zinc se dissout.

Bien que ces mots *courant* et *direction de courant* entraînent avec eux l'idée hypothétique d'un fluide qui circulerait comme de l'eau dans un canal, ils doivent être conservés, parce qu'ils sont consacrés par l'usage et qu'ils suffisent aux nécessités du langage. J'en restreindrai toutefois provisoirement le sens à la définition qui précède. L'étude

des phénomènes nous conduirait à supposer que le courant marche dans un sens contraire au sens indiqué plus haut, qu'il n'en résulterait qu'une simple modification dans l'énoncé des faits.

L'expérience démontre qu'un courant est susceptible d'accroissement ou de diminution, et l'on est sans cesse appelé à constater et à évaluer les variations qu'il subit, comme aussi à mesurer sa valeur propre ou son *intensité* à un moment donné.

Avec tous les physiciens je définis ainsi l'*intensité du courant*. Imaginons que nous ayons deux courants identiques, et que nous les réunissions en un seul sans qu'aucun d'eux en éprouve d'altération ; le courant résultant de cette superposition sera le double en intensité de chacun des deux courants composants. Un courant triple, quadruple..., sera considéré comme formé par la superposition sans altération de trois, quatre... courants identiques. Réciproquement, si nous partageons un courant en deux, trois, quatre... parties égales entre elles, sans perte ni gain, chacune des parties aura une intensité égale à la moitié, au tiers, au quart... de l'intensité du courant primitif.

Nous ne pouvons ni voir ni saisir l'électricité, non plus que la chaleur ; nous ne jugeons de sa présence que par ses effets apparents. Dans les divers phénomènes susceptibles de mesure produits par les courants électriques, la *quantité* de l'effet obtenu est-elle en rapport avec l'*intensité du courant* telle qu'elle vient d'être définie ? Parmi ces phénomènes en existe-t-il un qui se reproduise partout et toujours dans des conditions telles qu'il puisse nous fournir un moyen de choisir conventionnellement une unité que chaque physicien puisse toujours et en tout lieu reconnaître sans exiger de soins particuliers et d'autres instruments que ceux qui sont entre les mains de tous : la balance, par exemple ?

La science est en état de répondre positivement à ces deux questions. On admet, en effet, que les effets chimiques et magnétiques des courants sont proportionnels à l'intensité de ces courants; que leurs effets calorifiques et lumineux sont proportionnels au carré de cette même intensité, toute autre condition restant d'ailleurs la même. Ces quatre ordres de phénomènes peuvent donc fournir des procédés de mesure; mais au point de vue pratique, il n'en est aucun qui présente autant de garanties d'exactitude et de simplicité d'application que la décomposition des sels dans les voltamètres. Je m'occuperai donc d'abord du voltamètre.

Je ferai remarquer toutefois que l'adoption d'une unité de courant n'exclut pas nécessairement l'idée de spécificités d'action que l'on voudrait attribuer à des courants d'origines diverses. Il me suffit que cette unité puisse être retrouvée partout la même. Si les spécificités existent, elles sauront se produire.

CHAPITRE PREMIER.

DES VOLTAMÈTRES.

§ I. — Des voltamètres à dépôt métallique.

Nicholson et Carlisle sont les premiers qui aient décomposé l'eau par la pile. Cruikshank, Davy, Berzelius et Hisinger reprirent successivement ce phénomène, dont ils précisèrent mieux la nature et qu'ils étendirent à d'autres composés. Puis vient M. Faraday, qui établit ces deux lois remarquables :

1° L'action décomposante d'un courant est constante pour une même quantité d'électricité.

2° Lorsqu'un même courant traverse pendant le même temps plusieurs composés, il doit nécessairement séparer

dans chacun d'eux leurs éléments en quantités proportionnelles à leurs équivalents.

Ces deux lois devinrent l'occasion et le point de départ de recherches nombreuses dues à MM. Daniell, Matteucci, Becquerel père et fils, Hittorff, Beetz, Buff, Soret et autres.

Les résultats de toutes ces recherches, et particulièrement de celles de M. Buff et de M. Soret sur la décomposition des sels d'argent et de cuivre, pouvaient déjà donner toute confiance dans l'emploi de ces substances à la détermination de notre unité. Cependant l'importance de cette détermination est telle que j'ai cru devoir reprendre la question, afin de me rendre compte de la valeur des causes d'erreurs que l'on y peut rencontrer, des moyens qui peuvent les faire apparaître et des précautions à prendre pour les éviter. C'est au point de vue pratique surtout que je me suis placé; je me suis donc servi d'abord des matières telles que les fournit le commerce, et ce n'est qu'à mesure que des causes d'erreurs se sont manifestées que j'ai cherché à les faire disparaître.

Conformément à la définition de l'intensité du courant rappelée plus haut, j'ai toujours comparé l'action chimique de courants ou fractions de courants isolés à l'action chimique de ces mêmes courants partiels réunis algébriquement en un seul, c'est-à-dire superposés, soit de même sens, soit de sens contraire.

Comme je me réserve de publier dans un mémoire spécial le résultat de mes recherches sur l'électrolyse des combinaisons chimiques envisagée d'une manière générale, je ne relaterai dans ce premier travail que celles de ces expériences qui intéressent directement l'objet que j'y ai en vue.

Sur une traverse de bois verni au bitume de Judée sont fixées parallèlement dix pièces de cuivre toutes semblables. Chacune de ces pièces est terminée inférieurement par une

pince à vis destinée à fixer une électrode, et supérieurement par une seconde pince destinée à introduire l'électrode dans le circuit du courant. La traverse de bois est portée horizontalement par un pied de cuivre sur lequel elle peut être fixée à la hauteur voulue au moyen d'une vis de pression. Au-dessous des pièces de cuivre et de leurs électrodes sont placés des vases de dimensions variables contenant les liquides dans lesquels les électrodes doivent plonger deux à deux. Je pouvais ainsi monter en même temps jusqu'à cinq voltamètres différents et les grouper à volonté. D'autres appareils du même genre portent chacun un voltamètre séparé.

Afin de suivre plus facilement la marche des expériences, un des courants partiels ou total passait à sa sortie de son voltamètre dans une boussole de Weber qui m'indiquait la force du courant.

J'ai opéré principalement sur deux espèces de dissolutions salines, l'une contenant du nitrate d'argent, l'autre du sulfate de cuivre. Les électrodes positives étaient toujours de même nature que le métal dissous, pour conserver à la dissolution son titre et sa neutralité; les électrodes négatives étaient de cuivre, d'argent, ou plus ordinairement de platine.

Ma balance est un trébuchet des frères Collot, pouvant peser 10 grammes à près d'un dixième de milligramme.

M. Buff a opéré principalement sur le nitrate d'argent neutre et pur. Son but était de vérifier la loi de Faraday pour les très faibles courants exigeant des actions très prolongées pour donner des résultats suffisants. Le nitrate d'argent convient seul en effet dans ce cas, parce que l'argent est peu oxydable, et que son équivalent, très exactement connu, est un des plus élevés.

Voici deux résultats obtenus par M. Buff.

I.

Un même courant traverse successivement deux voltamètres A et B montés avec des lames d'argent fin et une dissolution de 2,5 pour 100 de nitrate d'argent neutre dans l'eau distillée.

Durée de l'expérience, 216 heures.

POIDS DE L'ARGENT DÉPOSÉ.			
	Lame positive.	Lame négative.	Différence.
Volt. A.	— 0,2670	+ 0,2666	— 0,0004
Volt. B.	— 0,2676	+ 0,2674	— 0,0002
Différence. . . .	0,0006	0,0008	

Écart relatif maximum, 0,003.

Intensité moyenne du courant, $i = 11,45$.

II.

Un même courant traverse successivement deux voltamètres A et B montés avec des lames d'argent fin, et contenant, le premier une dissolution de nitrate d'argent neutre aux 2,5 pour 100, le second une dissolution à 1 pour 100.

Durée de l'expérience, 51 heures 30 minutes.

	Poids du métal déposé sur les lames négatives.
Volt. A.	— 0 ^{gr} ,12466
Volt. B.	— 0 ^{gr} ,12416
Différence. . . .	0 ^{gr} ,00050

Écart relatif, 0,004.

Intensité moyenne du courant, $i = 22,36$.

Les écarts qui existent entre les résultats précédents sont de beaucoup supérieurs à la limite de précision de la ba-

lance employée ; mais ils sont relativement faibles, surtout si l'on a égard à la durée considérable de l'expérience.

La pesée simultanée des lames négatives et positives ne peut donner de résultats aussi concordants qu'à la condition que ces lames, au moins les positives, soient d'argent chimiquement pur de cuivre. En opérant sur des lames qui m'avaient été vendues comme argent fin, et qui n'étaient qu'au titre de 985 millièmes de fin, j'ai obtenu les résultats suivants.

III.

Un même courant traverse successivement deux volta-mètres A et B montés avec des lames d'argent plongeant dans une dissolution à 5 pour 100 de nitrate d'argent cristallisé ordinaire.

Durée de l'expérience, 48 heures.

POIDS DE L'ARGENT			
	dissous sur les lames positives.	réduit sur les lames négatives.	Différence.
Volt. A.	— 0 ^{gr} ,3495	+ 0,3245	+ 0,0050
Volt. B.	— 0 ^{gr} ,3205	+ 0,3247	+ 0,0042
Différence. .	0 ^{gr} ,0040	0,0002	

Les résultats sont à peu près les mêmes pour les deux volta-mètres ; dans l'un et l'autre le dépôt effectué sur les lames négatives l'emporte d'une manière notable sur le poids du métal pris aux lames positives. Mais si l'on admet que l'alliage de cuivre et d'argent se soit dissous intégralement sur les lames positives, tandis qu'il se déposait de l'argent pur sur les lames négatives, cet écart disparaît d'une manière presque complète. En effet, en calculant d'après les nombres qui précèdent quelle devrait être la composition de l'alliage, en admettant pour équivalents de l'argent et du cuivre les nombres 108 et 31,5, je trouve 0,982 d'argent et 0,018

de cuivre. Il est très probable que le cuivre aura été attaqué en plus forte proportion que l'argent, plus même que ne l'indique l'expérience. Le nitrate d'argent cristallisé ordinaire retient en effet toujours des traces d'acide nitrique qui ont pu absorber une partie de l'hydrogène ou de l'argent naissant.

Quoi qu'il en soit, comme la préparation de l'argent chimiquement pur et son étirage ou laminage peuvent quelquefois devenir un embarras pour le physicien, j'ai renoncé à tenir compte du poids du métal dissous sur les lames positives, pour ne m'occuper que des lames négatives, sauf à rechercher quelle pouvait être l'influence de la petite quantité de cuivre que les lames positives pourraient apporter dans la dissolution. Nous avons également à voir quelle est la part des traces d'acide nitrique contenu dans le nitrate d'argent cristallisé. L'expérience qui suit a été faite dans ce dernier but.

IV.

Un même courant se partage entre quatre voltamètres A montés avec des lames d'argent et une dissolution de 2,5 pour 100 de nitrate d'argent cristallisé ordinaire, la même que précédemment; puis les quatre courants partiels se réunissent dans un cinquième voltamètre B monté comme les quatre autres.

Durée de l'expérience, 42 heures.

	Poids de l'argent déposé.
Volt. A ₁	— 0,0005
Volt. A ₂	+ 0,0028
Volt. A ₃	+ 0,4452
Volt. A ₄	+ 0,4708
Total	0,3183
Volt. B.	0,3204
Différence.	0,0048

Le dépôt effectué sur la lame négative du voltamètre B l'emporte de beaucoup sur la somme des dépôts effectués sur les lames négatives des voltamètres A_1, A_2, A_3, A_4 ; mais en même temps le dépôt est négatif sur la lame A_1 . Les communications ont évidemment été mal établies avec ce voltamètre où le courant a été nul. La perte 0,0005 y est donc due à l'action de la liqueur acide. En admettant qu'un effet pareil ait été produit dans tous les voltamètres, et que même la perte s'y soit élevée à 0,0006, nous arriverions aux résultats suivants :

Volt. A_1	0,0004
Volt. A_2	0,0034
Volt. A_3	0,1458
Volt. A_4	0,1714
	<hr/>
Total.	0,3207
Volt. B.	0,3207
	<hr/>
Différence.	0,0000

La pesée du voltamètre A_1 serait alors en erreur d'un dixième de milligramme; mais il est plus probable que les erreurs se répartissent et se compensent.

Il est donc nécessaire d'opérer sur des liqueurs parfaitement neutres. Le nitrate d'argent se prête facilement à cette purification, il suffit de le chauffer jusqu'à sa fusion. C'est sur le nitrate ainsi fondu que mes expériences ultérieures ont été faites.

V.

Un même courant se partage entre quatre voltamètres A montés avec une dissolution à 2,5 pour 100 de nitrate d'argent fondu et neutre et des lames négatives de platine, puis ces quatre courants partiels se réunissent en un seul dans un cinquième voltamètre B monté comme les précédents.

Durée de l'expérience, 44 heures.

	Poids du métal déposé.
Volt. A ₁	0,1735
Volt. A ₂	0,1723
Volt. A ₃	0,1750
Volt. A ₄	0,1748
Total.	<u>0,6956</u>
Volt. B.	0,6958
Différence.	<u>0,0002</u>

différence que j'attribuerais à l'influence de l'air, si elle n'était pas comprise dans la limite d'erreur des pesées.

L'argent déposé sur les lames de platine y est cristallin et peu adhérent; le lavage s'est fait avec assez de difficulté, et il faut prendre de grandes précautions pour ne pas en perdre. Il ne s'y dépose que par places. Pour éviter cet inconvénient, il faut laisser le platine séjourner dans une dissolution chaude de potasse, le laver à grande eau, puis à l'eau distillée, et l'essuyer avec du papier joseph neuf, sans le toucher avec les doigts, au moins dans la partie qui doit recevoir le dépôt d'argent.

Afin d'étudier l'influence que peut exercer sur le dépôt le cuivre qui peut se trouver dans la dissolution de nitrate d'argent, j'ai fait déposer 0,1572 de cuivre sur une lame de platine, puis j'ai plongé cette lame dans une dissolution à 2,5 pour 100 de nitrate d'argent fondu contenant environ 2 grammes d'argent. Le cuivre s'y est dissous, et la liqueur, après filtration, s'est trouvée légèrement colorée en bleu. Cette liqueur a servi à l'expérience suivante.

VI.

Un même courant traverse successivement deux voltmètres montés, l'un, B, avec la dissolution qui précède, l'autre,

A, avec une dissolution à 2,5 pour 100 de nitrate d'argent sans cuivre.

Durée de l'expérience, 4 heures.

	Poids du métal déposé.
Volt. A.	0,2854
Volt. B.	0,2850
Différence.	<u>0,0004</u>

Il faut opérer longtemps sur une dissolution de nitrate d'argent, même en employant pour électrode positive de l'argent au titre des monnaies, pour que la proportion de cuivre devienne aussi forte dans la dissolution ; et d'ailleurs on en est averti par la coloration bleue très sensible qui se manifeste. Il est donc facile d'éviter toute cause d'erreur de ce fait. Ces recherches préliminaires étant terminées, j'aborde la question de la proportionnalité du dépôt à l'intensité du courant.

VII.

Un même courant se partage d'abord entre quatre voltamètres A, montés avec une dissolution à 2,5 pour 100 de nitrate d'argent pur et neutre ; les quatre courants partiels se réunissent ensuite dans un cinquième voltamètre B, monté de la même manière que les quatre autres.

Durée de l'expérience, 47 heures.

	Poids du métal déposé.	Intensité du courant.
Volt. A ₁	0,0542	$i = 40,68$
A ₂	0,0563	41,09
A ₃	0,0538	40,59
A ₄	0,0649	42,79
Total.	<u>0,2292</u>	<u>$i = 45,15$</u>
Volt. B.	<u>0,2295</u>	$i = 45,21$
Différence.	0,0003	

Les expériences suivantes ont été faites avec des courants de plus en plus forts.

VIII.

Durée de l'expérience, 48 heures.

	Poids de l'argent réduit.	Intensité du courant.
Volt. A ₁	0,0924	$i = 47,53$
A ₂	0,0975	50,15
A ₃	0,4470	60,18
A ₄	0,4440	58,64
Total.	<u>0,4209</u>	<u>246,50</u>
Volt. B.	0,4210	246,56
Différence.	0,0001	000,06

IX.

Durée de l'expérience, 44 heures.

	Poids de l'argent réduit.	Intensité du courant.
Volt. A ₁	0,4645	$i = 435,95$
A ₂	0,4723	445,04
A ₃	0,4748	447,44
A ₄	0,4746	444,44
Total.	<u>0,6802</u>	<u>572,6</u>
Volt. B.	0,6804	572,7
Différence.	0,0002	000,4

X.

Durée de l'expérience, 6 heures.

	Poids de l'argent déposé.	Intensité du courant.
Volt. A ₁	0,2404	$i = 324,69$
A ₂	0,2342	364,42
A ₃	0,2537	394,54
A ₄	0,1994	307,72
Total.	<u>0,8977</u>	$i = 4385,34$
Volt. B.	0,8979	4385,66
Différence	0,0002	0000,32

XI.

Durée de l'expérience, 3 heures.

	Poids de l'argent déposé.	Intensité du courant.
Volt. A ₁	0,4804	$i = 356,79$
A ₂	0,4800	355,55
A ₃	0,4227	378,70
A ₄	0,2045	621,94
Total.	<u>0,6846</u>	$i = 2442,9$
Volt. B.	0,6841	$i = 2444,4$
Différence.	<u>0,0005</u>	0004,5

L'argent est si peu adhérent sur la lame négative de B, qu'il a fallu le recueillir en dehors de la lame, ce qui a rendu sa pesée assez incertaine.

La proportionnalité du dépôt à l'intensité du courant peut s'établir également d'une autre manière. Le dépôt en effet s'effectue généralement d'une façon à peu près uniforme sur les lames négatives. Doubler l'étendue de celles-ci, c'est réduire à moitié l'intensité du courant qui traverse chaque unité de surface, le courant total restant d'ailleurs le même. En réalité, le partage d'un courant entre quatre voltamètres semblables revient à quadrupler l'étendue de la lame négative; or il est possible d'étendre beaucoup plus les limites de l'opération sans multiplier les voltamètres. C'est ce que j'ai fait dans les deux expériences qui suivent.

XII.

Un même courant traverse successivement deux voltamètres montés avec la même dissolution à 2,5 pour 100 de nitrate d'argent neutre. Dans l'un des voltamètres, A, la lame négative présente une surface immergée totale de 16 centimètres carrés; dans l'autre, B, plonge un fil de platine dont la surface immergée n'est au début que de 0^{cc},942.

Rapport des surfaces, 16,99.

Durée de l'expérience, 24 heures.

	Poids du métal déposé.
Volt. A.	0,4683
Volt. B.	0,4684
Différence.	<u>0,0001</u>

XIII.

Même expérience.

La lame négative de A est remplacée par une autre lame dont la surface immergée est de 35^{cc},2 ; le voltamètre B conserve son fil.

Rapport des surfaces immergées, 37,37 : 4.

Durée de l'expérience, 42 heures.

	Poids de l'argent réduit.
Volt. A.	0,4325
Volt. B.	0,4328
Différence.	<u>0,0003</u>

Les rapports entre les intensités des courants qui traversent chaque unité de surface des lames et du fil négatifs étaient environ de 17 à 1 dans la première expérience, et de 37 à 1 dans la seconde. Les écarts, même le dernier, sont restés dans les limites des erreurs possibles de pesée.

Dans toutes ces expériences, la nature de la pile n'exerce aucune influence sur les résultats, ainsi que l'on devait s'y attendre. C'est ce qui résulte des deux expériences qui suivent.

XIV.

Quatre courants fournis par quatre piles distinctes montées avec le sulfate de mercure, et composées, les trois premières d'un seul élément, la quatrième de deux, traversent chacun un voltamètre A, monté comme précédemment avec

les lames de platine ordinaire. Ces quatre courants se réunissent ensuite, trois du même sens, et le quatrième de sens contraire dans un cinquième voltamètre B, monté comme les autres.

Durée de l'expérience, 42 heures.

	Poids du métal réduit.
Volt. A ₁	+ 0,2412
A ₂	+ 0,2425
A ₃	+ 0,2813
Total.	+ 0,7650
Volt. A ₄	— 0,4093
Différence.	+ 0,3557
Volt. B.	+ 0,3555
Différence.	0,0002

La même expérience est reprise en remplaçant trois des piles au sulfate de mercure par des piles différentes aux sels de plomb, de cuivre, et au bichromate de potasse additionné d'acide sulfurique.

XV.

Durée de l'expérience, 40 heures.

	Poids du métal déposé.
Volt. A ₁ . Pile au bichromate.	+ 0,3267
A ₂ . Pile au sel de plomb.	+ 0,0052
A ₃ . Pile au sel de cuivre.	+ 0,0065
Total.	0,3384
A ₄ . Pile au sel de mercure.	— 0,1678
Différence.	0,1706
Volt. B.	0,1708
Différence	0,0002

Les expériences voltamétriques se font nécessairement à

la température ordinaire, qui peut varier dans des limites assez larges. Il était donc important d'examiner quelle pouvait être l'influence de la température sur le poids du métal réduit. M. Soret, en effet, en opérant sur des voltamètres montés avec du sulfate de cuivre, avait obtenu un dépôt sensiblement moindre à 100° qu'à 20°, ce qu'il attribue à l'action dissolvante du sulfate de cuivre sur le cuivre ; mes expériences de Montpellier (28 avril 1846) m'avaient fourni un résultat contraire que je transcris ici.

XVI.

Un même courant traverse successivement deux voltamètres montés avec une même dissolution de sulfate de cuivre et des lames de cuivre de mêmes dimensions. L'une, B, est à 15° ; l'autre, B', plonge dans de l'eau maintenue à l'ébullition.

Durée de l'expérience, 4 heure.

Volt. B à 15°. Dépôt de cuivre.	0 ^{gr} ,034
Volt. B' à 100°.	0 ^{gr} ,037
Différence.	0 ^{gr} ,003

Tandis que le cuivre de B est d'un beau rose, celui qui est déposé en B' est poreux, d'un rouge-brique et incomplètement réduit.

J'ai repris cette expérience avec le nitrate d'argent, seulement je me suis tenu entre les limites extrêmes de température dans lesquelles on puisse opérer.

XVII.

Un même courant traverse successivement deux voltamètres montés comme à l'ordinaire, avec des lames négatives de

platine et une dissolution à 2,5 pour 100 de nitrate d'argent fondu et neutre.

Durée de l'expérience, 6 heures.

	Poids de l'argent réduit.
Volt. B à 0°.	0,2573
Volt. B' à 40°.	0,2570
	<hr/>
Différence.	0,0003

L'argent était en paillettes brillantes et tellement peu adhérentes dans le voltamètre B', qu'elles se détachaient d'elles-mêmes dans la dissolution.

Restait enfin à examiner l'influence du degré de concentration de la liqueur, ce qui a été l'objet de l'expérience suivante.

XVIII.

Un même courant traverse successivement deux voltamètres, montés l'un, A, avec une dissolution à 25 pour 100 de nitrate d'argent fondu et neutre, l'autre, B, avec la même dissolution étendue de 200 fois son volume d'eau.

Durée de l'expérience, 12 heures.

	Poids de l'argent réduit.
Volt. A.	0,4434
Volt. B.	0,4435
	<hr/>
Différence.	0,0001

Toutes les expériences qui précèdent, excepté l'expérience 16, ont été faites avec le nitrate d'argent. On pourrait les reproduire avec le sulfate de cuivre, et l'on y trouverait l'avantage, pour les forts courants, d'une adhérence beaucoup plus forte du cuivre déposé. Par contre, les résultats sont moins concordants et les causes d'erreur plus difficiles à éviter. Voici quelques expériences faites avec ce sel.

XIX.

Un même courant se partage entre quatre voltamètres A montés avec des lames de platine et une dissolution saturée de sulfate de cuivre du commerce ; puis les quatre courants partiels se réunissent dans un cinquième voltamètre dont la lame négative est remplacée par le fil de platine de l'expérience 11.

Durée de l'expérience, 45 heures.

	Poids du cuivre déposés.
Volt. A ₁	0,4744
A ₂	0,4755
A ₃	0,4604
A ₄	0,4381
Total.	0,6484
Volt. B.	0,6437
Différence.	0,0044

XX.

Même expérience avec du sulfate de cuivre purifié.

Durée de l'expérience, 47 heures.

Volt. A ₁	0,4942
A ₂	0,4979
A ₃	0,4928
A ₄	0,4899
Total.	0,7748
Volt. B.	0,7744
Différence.	0,0004

Je ne puis admettre ici une action dissolvante de la dissolution sur le cuivre ; car cette action eût été plus marquée sur les quatre voltamètres A que sur le voltamètre B tout seul : or, c'est sur ces quatre voltamètres que le dépôt a été

le plus fort. Cette action dissolvante est réelle cependant. Le sulfate de fer que contiennent tous les sulfates de cuivre du commerce prend de l'oxygène à l'air et se transforme en sulfate de sesquioxyde avec dépôt de sesquioxyde. Le sulfate de sesquioxyde cède à son tour de son oxygène au cuivre pour donner du sulfate de cuivre et du sulfate de protoxyde de fer ; mais cette action est très lente, à moins que la proportion de fer ne soit énorme.

Avec des courants très faibles et très prolongés, le même effet peut se reproduire ; mais avec des courants très énergiques, il peut se trouver masqué par un autre phénomène, la réduction du fer accompagnant celle du cuivre ; et comme l'équivalent du fer est moins élevé que celui du cuivre, cette réduction du fer diminue le poids du métal déposé. Or, dans les expériences 18 et 19, les quatre lames des voltamètres A présentaient une surface immergée totale de 64 centimètres carrés, tandis que le fil du voltamètre B n'en avait une que de 0^{cs},942 d'étendue, c'est-à-dire 68 fois moindre. A surface égale, le courant y était donc 68 fois plus fort, et la proportion du fer réduit a dû être plus considérable dans le voltamètre B que dans le voltamètre A. Le fer, offrant plus de résistance à la réduction que le cuivre, ne commence, en effet, à se réduire que lorsque l'intensité du courant est assez élevée.

Dans la seconde expérience où je me suis servi de sulfate de cuivre purifié, la différence est beaucoup moins marquée, quoiqu'elle soit encore sensible.

Une autre expérience jointe à la précédente m'a fait renoncer à l'emploi du sulfate de cuivre pour la fixation de mon unité : c'est qu'il semble que le cuivre déposé par la pile ne soit pas encore entièrement désoxydé, malgré sa belle couleur rose franc. C'est du moins la conclusion que je crois pouvoir tirer des deux expériences qui suivent.

XXI.

Un même courant traverse successivement deux voltamètres montés, l'un, A, avec une dissolution à 2,5 pour 100 de nitrate d'argent fondu, l'autre avec une dissolution à 2,5 pour 100 de sulfate de cuivre pur.

Durée de l'expérience, 45 heures.

Volt. A. Dépôt d'argent.	0,8840
Volt. B. Dépôt de cuivre.	0,2603
Rapport des deux poids.	108 à 31,84

XXII.

Même expérience. Durée, 48 heures.

Volt. A. Dépôt d'argent.	0,4825
Volt. B. Dépôt de cuivre.	0,1420
Rapport des deux poids.	408 à 31,80

Ces deux expériences donnent donc en moyenne, pour l'équivalent du cuivre 31,82, nombre plus élevé que celui que l'on adopte actuellement. Je crois donc prudent de s'en tenir au nitrate d'argent.

RÉSUMÉ.

Je ne me suis nullement proposé dans ce premier mémoire de vérifier dans leur généralité les lois de Faraday sur l'électrolyse des dissolutions salines; mon but est resté limité à la fixation de l'unité conventionnelle du courant, et je me suis occupé spécialement de la dissolution qui m'a paru offrir le plus de garanties de facilité et de précision dans l'exécution.

Or, des expériences qui précèdent, il résulte que si l'on s'en tient au dépôt effectué par le courant sur une lame ou

sur un fil de platine plongeant dans une dissolution de nitrate d'argent fondu neutre, et qu'on ne s'écarte pas trop des limites pratiques où je me suis renfermé :

1° Le dépôt effectué par diverses parties d'un courant qui se superposent de même sens ou de sens contraires dans un même voltamètre, est égal à la somme algébrique des dépôts effectués individuellement par chacun de ces courants dans son voltamètre spécial.

2° Un même courant dont on fait varier l'intensité en le divisant entre plusieurs voltamètres parallèles, ou en le disséminant sur des électrodes de grandeurs variables, produit des dépôts métalliques dont les poids sont exactement proportionnels à l'intensité du courant qui produit ces dépôts, du moins dans les limites suivantes :

De 40 à 45	Expérience VII.
47 à 216	VIII.
136 à 572	IX.
324 à 1385	X.
378 à 2413	XI.

Ou, en somme, de 40 à 2413.

3° Le dépôt effectué par divers courants continus qui se superposent de même sens ou de sens contraires dans un même voltamètre, est égal à la somme algébrique des dépôts effectués individuellement par chacun de ces courants dans son voltamètre spécial.

4° Que ces courants émanent d'une même pile, qu'ils proviennent de diverses piles de même nature ou de composition différente, le résultat reste le même.

La diversité d'origine du courant n'entraîne donc aucune spécificité d'action dans le voltamètre, au moins pour les piles mises en expérience, ce qui nous suffit, ces piles étant connues de tous les physiciens.

5° La nature, la forme et les dimensions des électrodes,

le volume, le degré de concentration et la température de la dissolution n'influencent en rien le rapport qui existe entre l'intensité du courant et la quantité de métal qu'il dépose par heure.

6° Les causes perturbatrices qui pourraient altérer les résultats obtenus sont toujours faciles à discerner et à écarter.

Je ne donne pas ces diverses propositions comme ayant une valeur absolue et comme étant d'une exactitude mathématique, mais comme étant physiquement vraies et satisfaisant à toutes les exigences de l'expérimentation. Le dépôt d'argent peut donc toujours et en tous lieux fournir un moyen simple, pratique et précis de rattacher les intensités de courant à une commune mesure.

Dans toute la série de mes mémoires auxquels celui-ci, ainsi que le suivant, forme une espèce d'introduction, j'ai pris pour unité la millièrne partie du courant qui en une heure réduit 108 milligrammes d'argent.

En désignant donc par p , exprimé en milligrammes, le poids d'argent réduit dans un nombre t d'heures par un courant constant d'intensité i , je pose l'égalité

$$i = \frac{1000 p}{108 t}.$$

C'est ainsi que j'ai calculé les intensités des courants inscrits aux expériences VII, VIII, IX, X et XI.

§ III. — Voltamètres à gaz.

L'emploi du voltamètre à gaz est loin d'être aussi favorable que l'emploi du voltamètre à dépôt métallique. Les inconvénients de celui-ci se retrouvent en entier dans celui-là; l'un et l'autre exigent que l'expérience dure d'autant plus longtemps que le courant est plus faible, et ne fournissent que l'intensité moyenne du courant pendant cette durée.

Si la mesure du volume d'un gaz est plus prompte que la double pesée d'une lame d'argent ou de platine, par contre elle exige des corrections relatives à la température, à la pression et à l'état hygrométrique du gaz, que la pesée rend inutiles. D'un autre côté, il est presque impossible de compter sur l'exactitude des indications du voltamètre à gaz, comme il résulte des expériences qui suivent et que nous empruntons aux principaux physiciens qui se sont occupés de cette question.

EXPÉRIENCES DE M. DE LA RIVE.

I.

Un courant passe au travers d'un voltamètre chargé d'une dissolution d'acide sulfurique très pur dans neuf fois son volume d'eau distillée. Les deux électrodes sont formées, l'une par une lame de platine contournée en spirale, l'autre par un fil de platine droit ; elles sont disposées chacune sous une cloche graduée remplie d'eau distillée. (De la Rive, *Traité d'électricité*, t. II, p. 252.)

VOLUME DES GAZ RECUEILLIS.

Première expérience.

Sur la lame.	Hydrogène	400 ^{cc}
Sur le fil.	Oxygène	50
	Oxygène calculé de l'hydrogène.	50
	Différence.	00 ^{cc}

Deuxième expérience. — Le sens du courant est renversé.

Lame.	Oxygène	46 ^{cc}	46 ^{cc}
Fil.	Hydrogène	44 ^{cc}	
	Oxygène calculé de l'hydrogène		20,5
	Différence.		— 4,5

II.

Les deux expériences précédentes sont reprises en sens inverse et immédiatement à la suite l'une de l'autre.

VOLUME DES GAZ RECUEILLIS.

Première expérience.

Sur le fil.	Hydrogène	20 ^{cc}
Sur la lame.	Oxygène	8
Oxygène calculé de l'hydrogène.		10
Différence.		— 2 ^{cc}

Deuxième expérience. — Le courant est renversé.

Sur la lame.	Hydrogène	45 ^{cc} ,50
Sur le fil.	Oxygène	10
Oxygène calculé de l'hydrogène.		7 ^{cc} ,75
Différence.		+ 2 ^{cc} ,25

EXPÉRIENCES DE M. FARADAY.

III.

Un même courant traverse successivement un voltamètre à gaz et un tube rempli de protochlorure d'étain maintenu en fusion par une lampe à alcool et dans lequel plongeaient deux fils de platine.

Poids de l'étain réduit.	3 ^{gr} ,5000
Poids de l'eau décomposée déduit du volume des gaz recueillis.	0 ^{gr} ,4900
Poids de l'eau calculé du poids de l'étain.	0 ^{gr} ,5625
Différence.	— 0 ^{gr} ,0725

$$\text{Sn} = 59$$

EXPÉRIENCES DE M. MATTEUCCI.

IV.

Un même courant traverse successivement un voltamètre à gaz et un voltamètre contenant de l'acétate de plomb.

Poids du plomb déposé.	0 ^{gr} ,037
Poids de l'eau décomposée déduit du volume des gaz recueillis.	0 ^{gr} ,0032244
Poids calculé du poids du plomb.	0 ^{gr} ,0032174
Différence.	— 0 ^{gr} ,000040 négligeable.

V.

Même expérience avec le nitrate d'argent :

Poids de l'argent réduit.	0 ^{gr} ,039
Poids de l'eau décomposée calculé du volume des gaz recueillis.	0 ^{gr} ,003216
Poids calculé du poids de l'argent.	0 ^{gr} ,003250
Différence.	0 ^{gr} ,000034
Erreur relative.	0,04

Voici les résultats que j'avais obtenus moi-même dans mes premières recherches (1846).

VI.

Un même courant traverse successivement deux voltamètres, l'un à eau acidulée et lames de platine, l'autre à sulfate de cuivre.

Durée de l'expérience, une heure.

$$t = 17^{\circ} \quad H = 757$$

Poids du cuivre réduit.	0 ^{gr} ,024
Mélange gazeux sec à 0° et sous la pression normale 760.	42 ^{cc} ,06
Volume du mélange calculé d'après le cuivre.	42 ^{cc} ,59
Différence.	— 0 ^{cc} ,52
Erreur relative.	0 ^{cc} ,042
Erreur en cuivre	0 ^{gr} ,004

VII.

Même expérience avec un courant plus fort

Durée de l'expérience, une heure.

$$t = 17^{\circ},5 \quad H = 736,4$$

Poids du cuivre réduit.	0 ^{gr} ,130
Mélange gazeux sec, à 0° et sous la pression normale 760.	63 ^{cc} ,56
Mélange calculé du cuivre.	68,215
Différence.	— 4 ^{cc} ,755
Erreur relative.	0,069
Erreur en cuivre.	0,008

VIII.

Le voltamètre à gaz a été disposé de manière à recueillir les gaz sur le mercure, et avant que l'expérience commençât la décomposition avait duré près d'une heure.

Durée de l'expérience, une heure.

$$t = 48^{\circ} \quad H = 759$$

Poids du cuivre déposé sur la lame négative.	0 ^{gr} ,421
Mélange gazeux sec, à 0° et sous la pression 760.	60 ^{gr} ,85
Mélange calculé d'après le cuivre.	<u>63^{gr},49</u>
Différence.	— 2 ^{gr} ,64
Erreur relative.	0 ^{gr} ,043
Erreur en cuivre	0 ^{gr} ,005

M. Schœnbein attribue ces écarts à un dépôt de gaz qui s'effectue sur les lames et y adhère. Le dépôt est réel ; mais une fois qu'il est produit, l'écart devrait cesser, ce qui n'est pas. M. De la Rive l'explique par une oxydation du platine. Cette oxydation devrait être assez marquée, quand on constate des pertes de 4 à 5 centimètres cubes d'oxygène, pour qu'on pût voir l'oxyde, qui serait d'ailleurs bien instable. Il est un autre fait qui se reproduit chaque fois que l'on opère sur des dissolutions acides et qui me paraît être la vraie cause de l'écart signalé : c'est la formation d'eau oxygénée sous l'influence de l'oxygène naissant. Cette eau oxygénée, se disséminant dans la liqueur acide, arrive au pôle négatif où elle est ramenée à l'état d'eau ordinaire par l'hydrogène naissant. Il y a donc perte d'oxygène d'abord, puis ensuite perte d'hydrogène s'ajoutant à la première. Cette double perte est variable avec le degré de concentration de l'acide et avec la température.

Je reviendrai sur ce phénomène à l'occasion des résistances au passage et des forces électromotrices ; le fait de son existence est tout ce qu'il importe de constater pour le moment. Par lui-même, il laissera toujours régner une grande incertitude sur l'exactitude des résultats obtenus avec

les voltamètres à gaz, ce qui m'a fait rejeter leur emploi, à moins qu'on n'empêche l'oxygène de se dégager en l'absorbant par un métal facilement oxydable, tel que le zinc.

CHAPITRE II.

BOUSSOLE.

Les voltamètres à dépôt métallique, excellents appareils de graduation, présentent comme instruments d'observation courante des inconvénients qui en restreignent l'emploi à des cas déterminés. Ce sont des *totaliseurs*, faisant connaître seulement l'intensité moyenne du courant pendant la durée d'une expérience, qui ne peut guère être moindre d'une heure, à moins que ce courant ne soit d'une très grande énergie. Sous ce rapport, ils sont d'une très grande importance pour le physicien, et j'en ai fait plusieurs fois usage en dehors de ce qui précède. Mais lorsqu'il s'agit de déterminer à un instant donné l'intensité d'un courant, et de suivre les variations par lesquelles il passe quand on change les résistances du circuit, aucun instrument, si ce n'est le thermomètre différentiel à fils métalliques, ne peut être mis en comparaison avec la boussole pour l'étendue, la promptitude et la sûreté des indications.

Sous ce dernier rapport il y a toutefois des précautions à prendre.

Les boussoles galvanométriques ont reçu des formes très variées, depuis le galvanomètre de Schweigger et la boussole astatique de Nobili, jusqu'aux boussoles de M. Pouillet et de M. Weber.

La boussole astatique de Nobili est d'une exquise sensibilité : elle subit des déviations considérables par l'influence des courants les plus faibles ; mais l'unité de mesure y est

soumise à des oscillations continues et d'un ordre élevé. Chacun sait, en effet, que le degré de force magnétique d'une aiguille aimantée varie avec la température et avec le temps; que cette variation est plus forte pour l'aiguille placée au rebours de la direction que la terre tend à lui donner que pour l'aiguille qui reste dans cette dernière direction. Or, si nous désignons par A et B les forces magnétiques des deux aiguilles d'un couple astatique, la force directrice de celui-ci sera égale à $A - B$. Admettons que $A - B$ soit égal à 0,001 de A, et que B diminue de 0,001 de B, $A - B$ deviendra sensiblement double. Dans ces conditions, l'action du courant sur chacune des aiguilles prise isolément n'aura pas changé d'une manière sensible; mais la force directrice terrestre ayant doublé sur le système, il faudra un courant double pour produire la même déviation. Cette circonstance n'a pas dû exercer d'influence bien fâcheuse sur l'exactitude des résultats obtenus par MM. Nobili, Melloni et la Provostaye et Desains dans les recherches si délicates qu'ils ont faites sur les radiations calorifiques, parce qu'il est permis d'admettre que le système astatique de leur boussole n'a pas varié d'une manière sensible pendant le peu de temps que durait chacune de leurs séries d'expériences, et qu'ils n'établissaient de comparaison qu'entre les termes d'une même série. Mais il n'en est pas moins évident, d'une manière générale, qu'une boussole astatique est impropre à fournir des résultats comparables à quelques jours seulement d'intervalle, à moins qu'on ne reprenne fréquemment des repères. Les rapports qui existent entre les intensités des courants et les déviations qui leur correspondent, ne dépendant que de la forme de l'appareil, resteront les mêmes à un même instant; mais la valeur absolue du courant qui produit une déviation constante doit y varier rapidement dans une forte proportion.

Avec une seule aiguille, au contraire, il n'en est plus ainsi.

Lorsque l'intensité magnétique d'une aiguille varie, la force déviatrice exercée par un courant sur cette aiguille varie dans le même rapport que la force directrice terrestre, pourvu que l'aiguille soit fortement trempée et aimantée à saturation. La déviation n'en sera donc pas modifiée, elle ne sera soumise qu'aux variations de la force directrice terrestre. Je n'ai jamais fait usage que de boussoles à une seule aiguille, remplaçant, comme l'a fait M. Weber, la sensibilité de la boussole par la précision des moyens de lecture.

La boussole qui m'a servi dans mes expériences faites au laboratoire de la faculté de Montpellier, est une boussole des sinus que j'avais construite moi-même au moyen d'un sextant de marine. L'aiguille aimantée portait perpendiculairement à sa direction une mince et longue aiguille de verre terminée par un morceau de papier blanc vertical sur lequel était tracée une ligne verticale très déliée. L'alidade du sextant portait une lunette horizontale à réticule vertical. Dans chaque observation la ligne devait coïncider avec le centre du réticule. Le sextant donnait la minute.

Voici le résumé des expériences que j'ai faites pour rattacher les indications de cette boussole à mon unité. Le courant était maintenu constant pendant toute la durée de chaque expérience au moyen d'un rhéostat.

Durée commune des expériences.	Déviation.	Cuivre déposé.	Cuivre calculé.	Différence.
1 heure.	50°	^{gr.} 0,0455	^{gr.} 0,0453	+ 0,0002
	30	0,0300	0,0299	+ 0,0001
	20	0,0205	0,0206	— 0,0001
	14,45	0,0120	0,0122	— 0,0002

Les nombres contenus dans la quatrième colonne de ce tableau ont été calculés en admettant la proportionnalité du courant aux sinus des déviations. Ma balance ne donnant que le demi-milligramme, les écarts de la cinquième co-

bonne n'ont aucune valeur. Le sinus de 50° est 76,60445 pour un rayon égal à 100; l'intensité du courant qui dépose 45^{milligr.}, 3 de cuivre par heure est, d'après mon unité, 1415,6; le facteur par lequel je devais multiplier les sinus des déviations observées est donc 18,48 dont le logarithme est 1,2667118.

Depuis mon arrivée à Paris j'ai pu me procurer une boussole de Weber dont l'emploi est beaucoup plus commode, en ce que, sans y toucher et sans faire de calcul, on peut immédiatement y lire avec exactitude les intensités relatives. Les déviations y sont toujours très faibles, et par suite l'état magnétique de l'aiguille est moins altéré par l'influence du courant; de plus, comme on évalue ces déviations ou leur tangente avec une grande précision, l'erreur de lecture n'en est pas accrue.

Pendant six ans cette boussole est restée posée sur une console fixée à un gros mur, dans le laboratoire du lycée Bonaparte, situé entre cour et jardin, assez loin des rues du Havre et de Commartin. Le passage des voitures imprime bien encore un léger mouvement de trépidation à l'appareil, mais il n'en résulte aucune gêne sensible pour les lectures. Il est une autre difficulté beaucoup plus grave, contre laquelle j'ai eu à lutter, qui m'a fait souvent perdre le fruit de journées entières de travail, et finalement m'a obligé de restreindre pendant l'été l'emploi de la boussole aux heures calmes de la nuit: c'est l'instabilité du zéro de la boussole.

La déclinaison est soumise à des oscillations diurnes régulières, dépassant de beaucoup les limites de précision de l'instrument. Par leur régularité même il serait assez facile de s'en rendre indépendant; mais, en dehors d'elles, l'aiguille est soumise à des oscillations irrégulières qui naissent brusquement sans cause connue, à certains jours et à certaines heures, surtout lorsque le soleil frappe sur le mur auquel

est adossée la boussole. J'avais d'abord attribué ces variations aux piles, mais la première observation faite en dehors de tout courant oblige à les attribuer à la boussole même. Ce très grave inconvénient nécessite les précautions les plus grandes dans les observations. Aussi je crois que l'on ne doit jamais éloigner la lunette de la boussole au delà de l'espace nécessaire pour utiliser les 250 divisions de la règle divisée. Plus les déviations produites par le courant seront grandes, moins les déplacements du zéro auront d'importance : or, quelque soin que l'on prenne, on n'est jamais complètement assuré d'avoir entièrement détruit l'effet de cette cause d'erreur ou de s'y être soustrait. Pour y parvenir autant que possible, j'ai toujours accompagné chaque mesure du courant d'une observation du zéro faite immédiatement avant et immédiatement après la mesure du courant. Souvent même j'ai dû avoir recours à une seconde boussole libre, et donnant la position du zéro au moment où se faisait la lecture de l'intensité. Je dois ajouter que dans nos habitations, où le fer est si abondant, les perturbations de l'aiguille sont beaucoup plus prononcées que dans les observatoires magnétiques.

Les boussoles de Weber, construites par Ruhmkorff, contiennent ordinairement trois fils, deux d'égale longueur et un troisième de longueur double. Dans ces conditions, la boussole ne supporte que des courants d'une très grande faiblesse. Afin d'aborder des courants plus énergiques, j'y ai ajouté trois autres fils : un premier fait cinq révolutions autour de l'aiguille ; c'est celui-là qui me sert le plus ordinairement ; un second fait une seule révolution ; le troisième enfin est tendu horizontalement sous le pied de la boussole.

Quel que soit le fil employé, lorsque les précautions convenables ont été prises, la boussole de Weber donne directement la mesure proportionnelle de l'intensité relative des

courants qui agissent sur elle, mais nullement leur intensité absolue. J'ai donc commencé par rattacher les indications de mon appareil à mon unité de courant. Voici deux exemples des opérations que j'ai faites pour cet objet.

J'ai fait passer un courant au travers d'une dissolution neutre de sulfate de cuivre par l'intermédiaire de deux lames de cuivre, puis au travers de la boussole. Au lieu de m'efforcer de maintenir le courant constant par des variations convenables dans les résistances, ce que les déplacements du zéro auraient rendu impraticable, j'ai fait usage d'une pile fonctionnant depuis plusieurs jours avec une grande régularité, et un jour que l'aiguille paraissait moins irrégulièrement agitée, je notais de temps en temps la déviation, l'heure et la position du zéro.

Le tableau suivant renferme la série des résultats observés. Le courant traversait le fil d'une seule révolution.

Durée du courant.	Déviation.	Produit.
5 min.	246,0	1230,0
5	247,6	1238,0
5	247,5	1237,5
5	248,4	1240,5
5	247,9	1239,5
45	246,9	3703,5
5	245,4	1227,0
40	246,0	2460,0
5	245,7	1228,5
40	245,5	2455,0
40	245,0	2450,0
40	244,0	2440,0
2	240,3	480,6
6	242,8	1456,8
5	240,6	1203,0
40	244,8	2448,0
40	242,0	2420,0
40	241,9	2419,0
40	241,8	2418,0
40	241,9	2419,0
35	244,6	8456,0
Total . 188 min.		Total : 45839,9

Valeur moyenne de la déviation.	242°,24
Poids du cuivre réduit.	0 ^{gr} ,5345
Intensité du courant correspondant à une déviation d'une division	22,38

Comme la limite de précision dans les lectures s'arrête à un dixième de division, je ne pouvais avec ce fil évaluer le courant qu'à deux unités près.

Mes occupations au lycée Bonaparte ne me laissant qu'un petit nombre d'heures libres et ma boussole étant plus tranquille le matin, le soir et pendant la nuit que dans le milieu du jour, je l'ai transportée chez moi, au milieu de la campagne. J'ai repris pour sa nouvelle position la vérification précédente que j'ai étendue aux cinq fils, après m'être assuré que la boussole est bien proportionnelle à elle-même, même pour le fil qui ne fait qu'une seule révolution.

Voici les résultats que j'ai obtenus avec une pile de Smée, d'une marche très régulière, quoique le courant ne restât pas constant.

Le courant traversait le fil formant cinq révolutions, puis le voltamètre à nitrate d'argent.

Durée du courant. <i>t.</i>	Déviati ^o n. <i>v.</i>	Produit. <i>it.</i>
39 min.	163,7	6384,3
25	172,4	4310,0
25	176,8	4420,0
23	179,6	4130,8
24	182,9	4389,6
46	185,9	8551,4
48	188,7	3996,6
29	190,5	5524,5
48	192,25	9228,0
4	192,8	771,2
60 *	202,7*	12162,0
57	200,8	11445,6
64	199,4	12764,6
30	197,7	5934,0
Total : 492 min.		Total : 93406,6

Valeur moyenne de la déviation.	489",85
Durée de l'expérience.	8 h. 42 m.
Poids de l'argent déposé.	0 ^{gr} ,8830
Valeur de l'intensité du courant corres- pondant à une déviation d'une division	5,2352

Les variations dans l'intensité du courant étaient dues à l'échauffement graduel de la pile, ce qui diminuait sa résistance intérieure, sauf pour le passage (") de 192,8 à 202,7, qui a été produit par un rechargement d'acide.

Voici le résumé des valeurs de l'intensité du courant correspondantes à chaque division de ma boussole pour chacun des six fils dont elle est garnie :

Fil CC.	0,202
Fil BB.	0,403
Fil AA.	0,404
Fil AB, 5 révolutions.	5,235
Fil AC, 4 révolution.	26,476
Fil rectiligne.	430,4

Je puis donc embrasser avec ma boussole des courants dont l'intensité varie entre les limites suivantes :

Fil CC.	0,02 à 50
Fil AA.	0,04 à 100
Fil AB.	0,5 à 4308
Fil AC.	2,647 à 6544
Fil DD.	13 à 32500

Ces coefficients doivent être vérifiés de temps à autre.

Les détails un peu longs dans lesquels je viens d'entrer tiennent à l'importance extrême que j'attache à la graduation des boussoles en fonction d'une unité bien exactement connue.

CHAPITRE III.

THERMOMÈTRE ÉLECTRIQUE.

Les boussoles, malgré tous leurs avantages, ne peuvent cependant, non plus que les voltamètres, suffire à toutes les exigences de l'expérimentation. Ils sont inapplicables en particulier lorsqu'il s'agit d'étudier les courants intermittents alternativement de sens contraires. Dans ce cas, je fais usage d'un thermomètre métallique dont les indications soient, autant que possible, indépendantes des variations de température et de pression.

Ce thermomètre se compose d'un miroir très léger supporté par trois fils de platine tirés du même bout. Deux de ces fils, situés dans un plan vertical parallèle à celui du miroir, s'enroulent à leur partie supérieure sur deux boutons de cuivre à l'aide desquels ils peuvent être introduits dans le circuit. Le troisième fil, situé à 5 millimètres en arrière du plan des deux autres, sert à maintenir la verticalité du miroir en lui fournissant un troisième appui. En avant du miroir se trouve une lunette horizontale munie d'une règle divisée verticale.

Les trois fils se dilatant de la même manière, le miroir reste parallèle à lui-même, quelle que soit la température extérieure; mais dès qu'un courant continu ou intermittent traverse les deux fils antérieurs, ce miroir s'incline d'une quantité proportionnelle au carré de l'intensité du courant moyen. L'équilibre est très rapidement atteint, et a lieu lorsqu'il y a égalité entre la chaleur dégagée par le courant et la chaleur perdue par les fils.

Ce thermomètre électrique est extrêmement sensible, et peut fournir des indications très précises. Je le gradue par com-

paraison avec ma boussole, et comme cette comparaison peut se faire à tout instant et avec une grande rapidité, les deux appareils se servent mutuellement de contrôle.

Je me suis borné jusqu'à présent à l'emploi des trois appareils qui précèdent. Je m'abstiendrai donc ici de discuter les autres.

DEUXIÈME MÉMOIRE.

De l'unité de résistance.

La fixation de l'unité de résistance est tout aussi importante que celle de l'unité du courant. M. Jacobi, qui a fait une étude approfondie des moyens de mesurer les courants, a proposé aux physiciens de rapporter les instruments avec lesquels ils ont l'habitude de mesurer les résistances à une même unité qui serait la résistance d'un fil de cuivre de 1 mètre de longueur sur 1 millimètre de diamètre. Mais comme la conductibilité du cuivre est très variable d'un échantillon à l'autre, le seul moyen d'obtenir des résultats comparables consistait à faire choix arbitrairement d'un fil quelconque, et de le faire voyager d'un physicien à l'autre. C'est ce que M. Jacobi a essayé de réaliser. Cette méthode est peu pratique, et malgré mon désir, je n'ai pu me procurer d'une manière certaine l'unité de résistance de M. Jacobi, et comparer mes résultats aux siens.

Le choix de l'unité de résistance ne doit pas être complètement arbitraire; il doit s'appuyer sur un fait théorique ou expérimental important, et surtout cette unité doit pouvoir être retrouvée d'une manière sûre par chaque physicien, au moyen de ses seules ressources. L'emploi du cuivre doit donc être rejeté; il en est de même du platine et de l'argent, qui peuvent bien, comme le cuivre, être employés à la formation de rhéostats que l'on aura gradués

en fonction de l'unité choisie, mais qui ne peuvent servir à la fixation de cette unité, parce que leur conductibilité est trop variable d'un échantillon à l'autre.

Le mercure, au contraire, est exempt de cet inconvénient. Il peut facilement être obtenu chimiquement pur, et son état liquide le met à l'abri des changements de texture qui résultent pour les fils métalliques des opérations mécaniques auxquelles ils ont été soumis. Aussi M. Jacobi a-t-il substitué à sa première unité celle d'une colonne de mercure pur de 1 mètre de long et de 1 millimètre de diamètre.

Dès mes premières recherches, en 1846, j'avais adopté pour unité de résistance celle d'une colonne de mercure pur, à 0°, de 1 mètre de long et de 1 millimètre carré de section. La série des expériences que je fis alors pour me procurer cette unité a été perdue; je n'en ai gardé que le résultat inséré dans les *Mémoires de l'Académie de Montpellier*. Mais à mon arrivée à Paris, en 1855, je dus réorganiser mes appareils et procéder de nouveau à leur graduation. Voici la série d'expériences que j'exécutai alors pour retrouver mon unité de résistance.

Je choisis deux tubes de verre aussi bien calibrés que possible, et je les divisai en millimètres dans toute leur longueur. Dans l'un deux j'introduisis un globule de mercure que je promenai successivement dans toute la longueur du tube en mesurant à chacune de ses stations sa longueur. Je pouvais évidemment considérer le tube comme cylindrique dans l'étendue de chaque espace occupé par le globule. Si donc je désigne par v le volume de cet index, par l sa longueur, par s la section du tube au point où il se trouve, et par r sa résistance au courant évaluée en fonction de mon unité, je puis poser :

$$\text{d'une part } v = ls, \text{ de l'autre } r = \frac{l}{s}; \text{ d'où } r = \frac{l^2}{v}.$$

Lorsque mon tube sera complètement rempli de mercure, je puis considérer le métal qu'il contiendra comme formé par la réunion simultanée de tous les index de même volume v que j'aurai placés successivement bout à bout dans ma première expérience. La résistance R de la colonne de mercure sera donc égale à la somme des résistances de tous ces index; d'où

$$R = \sum \frac{4}{v} l^2 = \frac{4}{v} \sum l^2.$$

I.

Voici maintenant le détail des résultats obtenus.

Premier tube. $t = 47^{\circ},5$.

Longueur de la gouttelette de mercure l en millimètres :

l .	l^2 .	l .	l^2 .
36,8	1354,24	36,8	1354,24
37,3	1391,29	36,5	1332,25
37,9	1436,41	36,8	1354,24
38,1	1451,61	36,6	1339,56
38,6	1489,96	37,0	1372,70
38,1	1451,61	37,1	1376,41
38,5	1482,25	37,3	1371,29
38,2	1459,24	37,3	1391,29
38,9	1513,21	37,3	1391,29
38,8	1505,44	37,0	1369,00
38,4	1470,56	36,1	1303,21
38,4	1474,56	35,4	1253,16
38,0	1444,00	35,6	1268,36

$$\sum l^2 = 36420,62,$$

$$\sum l = 972,8.$$

Longueur totale du tube 987,0.

Le tube a été rempli de mercure sur une longueur de 967,5; ce mercure, vidé et pesé, avait un poids de $4^{\text{gr}},502$. Le poids de mercure qui aurait rempli l'espace $\sum l = 972,8$, eût donc été de $4^{\text{gr}},5266$. Cet espace a été occupé par la

gouttelette de mercure portée vingt-six fois bout à bout, en sorte que le volume v , en millimètres, de la gouttelette est :

$$v = \frac{4526,6}{26 \times 13,596}.$$

La résistance des 972,8 de ma colonne de mercure était donc :

$$R_1 = \frac{26 \times 13,596}{4526,6} \times 36420,62,$$

et la résistance totale du tube,

$$R_1 = \frac{26 \times 13,596}{4526,6} \times \frac{987}{972,8} \times 36420,072 \times \frac{1}{1000}.$$

$$R_1 = 2,882.$$

II.

Deuxième tube.

$l.$	$l^2.$	$l.$	$l^2.$
28,0	784,00	31,2	973,44
28,5	812,25	31,6	998,56
28,6	817,96	32,0	1024,00
28,7	823,69	32,4	1049,76
28,8	829,44	32,6	1062,76
28,8	829,44	32,7	1069,29
28,9	835,21	32,2	1036,84
29,0	841,00	32,0	1024,00
29,2	852,64	31,7	1004,89
29,3	858,49	31,7	1004,89
29,4	864,36	31,6	998,56
29,8	888,04	31,8	1011,28
30,0	900,00	31,6	998,56
30,2	912,04	31,9	1017,51
30,4	924,16	32,2	1036,84
30,7	942,49	32,8	1075,84

$$\sum l = 980,0,$$

$$\sum l^2 = 30084,74.$$

Longueur totale du tube, 933,7.

Poids du mercure qui le remplit dans toute sa longueur, 3^{sr},268.

Poids du mercure qui occuperait $\leq l = 980$ millimètres, 3^{sr},266.

$$R_2 = \frac{32 \times 13,596}{3266,0} \times 30084,74 \times \frac{983,7}{980} \times \frac{1}{1000}.$$

$$R_2 = 4,129,$$

$$R_1 + R_2 = 7,044.$$

Avant de comparer cette résistance à celle de mes fils, il fallait déterminer le coefficient d'accroissement de résistance du mercure avec la température. A cet effet, je fis souder aux deux extrémités du tube R_1 deux bouts de tube de 7 à 8 millimètres de diamètre. Ce tube R_1 étant trop long, je le pliai d'abord en deux, puis en quatre, afin de réduire sa hauteur. Les deux espèces de godets qui le terminaient servaient à l'introduire dans le circuit, ou à l'en retirer au moyen d'un fil de dérivation gros et court. Le tout, plein de mercure, a été placé au milieu d'un vase de cuivre plein d'eau chauffé par une lampe à alcool et muni de son thermomètre.

La comparaison des résistances du mercure à diverses températures avec la résistance du fil du rhéostat maintenu à une température aussi constante que possible, m'a donné les résultats suivants :

III.

Température.	Longueur du fil du rhéostat équivalente au mercure.	
	Observée.	Calculée.
83°,35	43,88	43,84
68°,35	43,66	43,66
49°,7	43,40	43,40
40°,8	43,00	43,00

Ce qui me donne $Hg = 12,875 (1 + 0,0009 t)$.

Le coefficient 0,0009 diffère un peu du coefficient 0,00104 donné par M. Ed. Becquerel ; il devrait évidemment rester constant sans la dilatation du verre. Les nombres contenus dans la troisième colonne du tableau ci-dessus sont calculés de la formule qui précède. L'accord entre les résultats du calcul et de l'observation est complet jusqu'à 68°,35, température que l'on n'atteint jamais dans la pratique.

Les résistances de mes deux tubes de mercure R_1 et R_2 sont donc :

$$\begin{aligned} R_1 &= 2,882 (1 + 0,0009 t), \\ R_2 &= 4,429 (1 + 0,0009 t), \\ R_1 + R_2 &= 7,011 (1 + 0,009 t). \end{aligned}$$

Restait à graduer mes appareils de résistance en fonction de l'unité de résistance adoptée.

Les appareils de résistance employés par les physiciens varient beaucoup dans leur forme et la nature des conducteurs qui les composent. On peut les ranger en deux classes : les appareils à résistance variable, et les appareils à résistance fixe.

Le type des premiers est le rhéostat de M. Wheatstone, que la commodité de son emploi a fait adopter par la plupart des électriciens. Je n'en fais cependant usage que comme intermédiaire, parce qu'il est difficile d'y apprécier exactement la température du fil conducteur, et que la résistance de ce fil varie beaucoup avec cette température. Mes appareils ordinaires de résistance sont donc à résistance fixe.

Ils se composent de bouts d'un fil de platine très fin dont les extrémités sont soudées à des fils beaucoup plus gros et très courts, de façon que l'on puisse négliger, sinon leur résistance, au moins l'écart qui résulterait d'une appréciation inexacte de leur température.

Chacun de ces fils descend dans l'intérieur d'un tube de

verre étroit, ouvert à ses deux extrémités, puis il se relève extérieurement au tube et parallèlement à lui. Le tube et son fil sont disposés verticalement dans un tube d'un diamètre plus grand dans lequel plonge un thermomètre, et que l'on peut remplir d'eau. Dans ce cas, qui est toujours celui où je me place, le fil, étant très mince et plongeant directement dans l'eau dans toute sa longueur, prend exactement la température de cette eau, malgré le passage du courant. Les deux gros fils qui terminent chaque fil mince se recourbent en dehors du tube pour venir plonger dans des godets étroits, pleins de mercure et servant aux communications.

Pour rattacher les résistances de ces fils à l'unité adoptée, je me suis servi d'un rhéostat de M. Wheatstone construit par M. Ruhmkorff, et des deux fils égaux de ma boussole de Weber.

L'opération était conduite de la manière suivante :

Le courant d'une pile constante se partageait entre deux circuits, dont l'un contenait le rhéostat de Wheatstone à fil variable, et dont l'autre pouvait être accru à volonté de la résistance des deux tubes 1 et 2 remplis de mercure, ou de la résistance du fil de platine dont on voulait évaluer la résistance en fonction de l'unité choisie. A cet effet, mes deux tubes de verre étaient disposés horizontalement à côté l'un de l'autre et dans des directions presque parallèles ; deux de leurs extrémités voisines, mises en contact l'une avec l'autre, plongeaient dans une petite auge A, de cire molle, remplie de mercure. Afin de réduire la résistance additionnelle provenant de ce mercure, les tubes avaient été usés obliquement jusqu'à leur axe de manière à rapprocher le plus possible leurs deux extrémités en regard. Les extrémités opposées de ces mêmes tubes plongeaient chacune dans une auge B semblable, mais distincte ; ces deux dernières pouvaient être réunies entre elles par un gros fil de cuivre amalgamé.

Le second circuit aboutissait de la pile dans l'une de ces deux auges B, allait de l'autre auge B à l'un des godets du fil de platine, et de l'autre godet de ce même fil se continuait dans la boussole pour revenir à la pile. Dans ces conditions, le courant qui s'établirait dans cette partie du circuit traverserait à la fois, et la colonne de mercure, et le fil de platine; mais en réunissant ou les deux godets, ou les deux auges B par un fil de cuivre gros et court dont la résistance était à peine un deux-dix-millième d'unité, je pouvais supprimer l'une ou l'autre de ces deux résistances. Les deux courants partiels provenant du partage du courant total entre les deux circuits traversaient de sens contraires les deux fils égaux de la boussole de Weber, et je réglais la résistance du rhéostat Wheatstone de telle façon que l'aiguille se maintint à zéro.

IV.

Température, 17°, 4.

ρ , résistance de la portion du second circuit en dehors de la colonne de mercure et du fil de platine.

Hg, résistance du mercure.

P_2 , résistance du fil de platine n° 2.

Composition du second circuit.	Longueurs du fil du rhéostat qui équilibrent la résistance du second circuit.
ρ	5,62
$\rho + \text{Hg}$	21,95
ρ	5,63
$\rho + P_2$	22,54
ρ	5,64
$\rho + \text{Hg}$	21,96
ρ	5,64
$\rho + P_2$	22,55
ρ	5,63
$\rho + \text{Hg}$	21,95
ρ	5,62

RÉSUMÉ.

$$\text{Hg} = 16,32.$$

$$P_2 = 16,915.$$

De là je déduis pour la résistance de mon fil de platine à 17°,A :

$$P_2 = 7,044 (1 + 0,00090 \times 17^\circ,4) \times \frac{16,915}{16,32}.$$

$$P_2 = 7,374.$$

Cette résistance variant avec la température beaucoup plus rapidement que pour le mercure, j'ai déterminé sur le fil P_2 lui-même son coefficient d'accroissement de résistance. Cette détermination était d'autant plus nécessaire, que le coefficient du platine a été trouvé par M. Becquerel égal à 0,001861 entre 0° et 100°, tandis que les expériences de M. Lenz le portent à 0,00296 entre 0° et 100°, et à 0,00287 entre 0° et 200°.

Le fil P_2 et le tube de verre plein d'eau qui le contenait ont été plongés verticalement dans un vase de cuivre placé au-dessus d'une lampe à alcool. Le courant d'une pile constante se partageant comme précédemment entre deux circuits, dont l'un contenait le rhéostat Wheatstone, l'autre le fil de platine, j'égalisais les résistances des deux circuits latéraux d'abord en l'absence du platine, puis après avoir introduit le platine dans son circuit ; la différence des indications du rhéostat me donnait pour chaque cas la valeur relative de la résistance du platine. Je ne pouvais mesurer la température du rhéostat Wheatstone, je m'efforçais seulement de la maintenir constante pendant la durée de l'expérience.

Tant que la température du platine était peu élevée au-dessus ou abaissée au-dessous de la température de l'air, je pouvais admettre que cette température était fournie exactement par le thermomètre placé dans le même tube que lui ; mais il n'en était plus ainsi pour les températures un peu élevées. Dans ce cas, lorsque j'approchais de la température à laquelle je voulais opérer, je réglais le rhéostat de Wheatstone de façon que l'aiguille fût presque à zéro, puis

je faisais successivement monter ou descendre la température du fil de manière que l'aiguille déviât tantôt à droite tantôt à gauche, et à chacun de ses passages au zéro je notais la température. La même méthode a été suivie expérience III. Voici les résultats que j'ai obtenus :

V.

Longueur du fil du rhéostat introduit dans le circuit pour équilibrer le platine.		Température.	
18 ^m ,20.	descendante	46,3	⁰
—	ascendante	45,9	
—	descendante	46,3	
—	ascendante	46,3	
—	descendante	46,4	
	Moyenne.	46,3	

Longueur du fil du rhéostat équivalant au platine.		Température.	
18 ^m ,54.	ascendante	54,3	⁰
—	descendante	54,5	
—	ascendante	54,3	
—	descendante	54,5	
—	ascendante	54,4	
—	descendante	54,5	
—	ascendante	54,5	
—	descendante	54,5	
	Moyenne.	54,46	

17 ^m ,84.	descendante	35,5	⁰
—	ascendante	35,5	
—	descendante	35,6	
—	ascendante	35,5	
—	descendante	35,5	
	Moyenne.	35,5	

17 ^m ,01.		16,4	⁰
16 ^m ,87		13,4	

Ces divers résultats me conduisent, pour la résistance du platine P_2 exprimée en fonction du fil de cuivre du rhéostat, à la formule.

$$P_2 = 46,32(1 + 0,00249t),$$

de laquelle j'ai calculé le tableau suivant :

Température.	Résistances observées.	Résistances calculées.	Différences.
46,3	48,20	48,20	0,00
54,46	48,54	48,53	—0,01
35,5	47,84	47,76	—0,05
46,4	47,04	46,98	—0,03
43,4	46,87	46,86	—0,01

Différences peu élevées, d'ailleurs assez irrégulières, et qui s'amoiendrieraient en se répartissant, si je conservais la sixième décimale du coefficient adopté. Ce coefficient est compris entre les nombres 0,001864 de M. E. Becquerel et 0,00296 de M. Lenz.

La résistance de P_2 , exprimée en fonction de mon unité normale, devient donc :

$$P_2 = 7,072(1 + 0,00249t).$$

Les fils de mes divers appareils à résistance fixe ayant été tirés du même fil de platine, j'ai admis pour tous le même coefficient d'accroissement de résistance.

Voici les expériences qui m'ont permis d'évaluer leurs résistances relatives.

VI.

L'expérience est conduite comme la précédente, à l'exception que les tubes de verre qui renferment les fils de platine ont d'abord été vides d'eau.

Nature du second circuit.	Longueurs équivalentes du rhéostat Wheatstone.	Valeur de P.	
1. $\left\{ \begin{array}{l} \rho \\ \rho + P_1 \end{array} \right.$	$\begin{array}{l} 2,38 \\ 40,84 \end{array}$	$P_1 = 8,46$	
2. $\left\{ \begin{array}{l} \rho \\ \rho + P_2 \end{array} \right.$	$\begin{array}{l} 2,38 \\ 49,94 \end{array}$	$P_2 = 17,56$	
3. $\left\{ \begin{array}{l} \rho \\ \rho + P_3 \end{array} \right.$	$\begin{array}{l} 2,38 \\ 36,46 \end{array}$	$P_3 = 33,78$	
4. $\left\{ \begin{array}{l} \rho \\ \rho + P_4 \\ \rho + P_3 \\ \rho + P_3 \end{array} \right.$	$\begin{array}{l} 2,38 \\ 37,07 + r = 50,41 \\ 36,46 \\ 22,82 + r \quad r + 43,34 \end{array}$	$\begin{array}{l} \\ P_4 = 48,03 \\ P_3 = 33,78 \end{array}$	
	5. $\left\{ \begin{array}{l} \rho \\ \rho + P_3 \\ \rho + P_4 \\ \rho + P_4 \end{array} \right.$	$\begin{array}{l} 2,38 \\ 37,65 + r' = 74,45 \\ 50,44 \\ 46,64 + r' \quad r' = 33,80 \end{array}$	$\begin{array}{l} \\ P_5 = 69,07 \\ P_4 = 48,03 \end{array}$
		ρ	$2,38$
La série n° 4 me donne		$P_1 = 8,46$	
La série n° 2		$P_2 = 17,56$	
La série n° 3		$P_3 = 33,78$	

nombre qui se trouve reproduit dans la série n° 4. Dans celle-ci, pour déterminer P_4 , j'ai eu recours à une résistance additionnelle r ajoutée au circuit du rhéostat Wheatstone; les équivalents de $\rho + P_3$ avec et sans cette résistance r donnent :

$$r = 43,34,$$

d'où

$$P_4 = 48,03.$$

Le même procédé a été suivi dans la série n° 5, qui me donne :

$$r' = 33,80,$$

d'où

$$P_5 = 69,07.$$

Cette même série donne également $P_4 = 48,03$.

La nécessité d'opérer dans un temps très court dans lequel la température du rhéostat n'ait pas le temps de changer m'a empêché de répéter chaque détermination, mais j'ai repris le surlendemain la même expérience, les tubes étant également vides d'eau.

VII.

ρ	2,44	
$\rho + P_1$	40,89	$P_1 = 8,45$
ρ	2,44	
$\rho + P_2$	49,99	$P_2 = 47,55$
ρ	2,44	
$\rho + P_3$	36,12	$P_3 = 33,68$
ρ	2,44	
$\rho + P_4$	37,02 + r = 50,32	$P_4 = 47,88$
$\rho + P_3$	36,12	
$\rho + P_3$	22,82 + r = 43,30	
ρ	2,44	
ρ	2,44	
$\rho + P_5$	37,71 + P ₃ = 74,39	$P_5 = 68,95$
ρ	2,44	

Ces deux séries d'expériences me donnent

$$P_2 = 47,56 \quad \text{et} \quad P_2 = 47,55, \quad \text{pour } t = 44^{\circ},3 \text{ et } 44^{\circ},8.$$

L'expérience n° IV ne m'avait donné que

$$P_2 = 46,945 \quad \text{pour } t = 47^{\circ},4,$$

tandis que l'élévation de température aurait dû produire une variation en sens inverse dans les valeurs de P_2 . C'est que dans l'expérience IV le fil P_2 plongeait dans l'eau dont le thermomètre indiquait exactement la température, tandis que dans les expériences V et VI ce même fil plongeait dans l'air, auquel il ne cédait que lentement la chaleur dégagée en lui par le courant. La résistance 47,55 suppose une température du fil égale à $32^{\circ},5$, en négligeant la variation de tem-

pérature du rhéostat qu'on ne peut apprécier exactement. C'est à $32^{\circ},5$ que la perte de chaleur par l'air à $11^{\circ},8$ devenait égale au gain provenant pour le fil du courant qui le traversait. Aussi voit-on dans chaque expérience que l'équilibre des résistances met un certain temps à s'établir. C'est ce fait qui m'a déterminé à remplir d'eau les tubes qui contiennent mes fils.

VIII.

Même expérience que précédemment. Les fils plongent dans l'eau.

ρ	4,61	
$\rho + P_1$	43,03	$P_1 = 8,42$
ρ	4,61	
$\rho + P_2$	21,54	$P_2 = 16,93$
ρ	4,61	
$\rho + P_3$	38,07	$P_3 = 33,46$
ρ	4,61	
$\rho + P_4$	48,65 + $P_3 = 52,11$	$P_4 = 47,50$
ρ	4,61	
$\rho + P_5$	39,64 + $P_3 = 73,07$	$P_5 = 68,46$
ρ	4,61	
$\rho + P_5$	39,62 + $P_3 = 73,08$	$P_5 = 68,47$
$\rho + P_4$	48,66 + $P_3 = 52,12$	$P_4 = 47,51$
ρ	4,61	
$\rho + P_3$	38,07	$P_3 = 33,46$
$\rho + P_2$	21,54	$P_2 = 16,93$
ρ	4,61	
$\rho + P_4$	43,00	$P_4 = 8,39$
ρ	4,61	

C'est à ces dernières expériences que je me suis arrêté, précisément parce que la température des fils de platine y était parfaitement connue. L'eau n'y joue pas d'une manière appréciable le rôle de conducteur, alors même qu'elle pourrait

conduire par elle-même, parce que le courant se trouve nécessairement arrêté par le travail qu'il faudrait dépenser pour décomposer l'eau. Ces résultats ne peuvent être comparés à d'autres obtenus à d'autres époques, la résistance du rhéostat étant variable, mais ils sont parfaitement comparables entre eux.

La résistance de P_2 étant à 0° , $7^m,072$ de mercure à 0° , j'ai pour mes cinq résistances de platine :

$$P_1 = 3,525 (1 + 0,00249t)$$

$$P_2 = 7,072 (1 + 0,00249t)$$

$$P_3 = 13,978 (1 + 0,00249t)$$

$$P_4 = 19,845 (1 + 0,00249t)$$

$$P_5 = 28,596 (1 + 0,00249t)$$

Ces résistances peuvent être multipliées à volonté suivant les besoins, pour que le rhéostat Wheatstone n'ait plus qu'à former l'appoint de quelques dixièmes d'unité.

En comparant mon fil de platine P_5 avec des bobines de résistance de M. Bréguet, dans lesquelles l'unité adoptée est le kilomètre de fil télégraphique, j'ai trouvé qu'à $18^\circ,5$ mon fil équivaut à 2930 mètres de la bobine Bréguet, à la même température.

$$\text{Or à } 18^\circ,5, P_5 = 29,682.$$

Mon unité équivaut donc à $98^m,8$ environ des fils télégraphiques, c'est-à-dire qu'elle est environ dix fois moindre que l'unité kilométrique adoptée dans la télégraphie. Je ne donne toutefois ce résultat que comme renseignement approximatif, l'unité kilométrique étant très loin d'être nettement définie.

Je terminerai ce second mémoire par une application des données fournies par la fixation de mes unités.

J'ai monté une pile de Smée formée d'une lame de platine platiné et d'une lame de zinc amalgamé ; j'ai mesuré

la force électromotrice de cette pile à deux époques différentes. A cet effet, j'ai déterminé à la boussole l'intensité du courant dans un circuit arbitraire de résistance inconnue ρ , puis j'ai ajouté à ce circuit la résistance P_s , et j'ai de nouveau déterminé l'intensité du courant. J'ai eu ainsi deux valeurs de i et deux équations :

$$i = \frac{A}{\rho}, \quad i' = \frac{A}{\rho + P_s},$$

desquelles je pouvais tirer ρ et A .

Voici les résultats que j'ai obtenus.

IX.

17 avril 1864. $t = 45^{\circ}, 8$.

Pile de Smée. 4 élément
 Acide sulfurique. 2,5 pour 100.

Fil de la boussole formant cinq révolutions, et pour lequel chaque unité de déviation équivaut, en intensité de courant, à 5,235.

Résistances.	Déviation.	Intensités moyennes.
$\rho + P_s$	71,7	
ρ	426,6	
$\rho + P_s$	71,7	$\rho + P$. 374,88
		ρ . 662,23
$\rho + P_s$	71,4	
ρ	426,4	$P_s = 29,74$
$\rho + P_s$	71,4	$\rho = 38,68$
		$A = 25622$
$\rho + P_s$	71,6	
ρ	426,55	
$\rho + P_s$	71,7	$i = \frac{25622}{38,68 + i}$
$\rho + P_s$	71,4	
ρ	426,7	
$\rho + P_s$	72,0	

X.

18 avril 1861. $t = 16^{\circ},7$

Même expérience, même pile.

Résistances.	Déviation.	Intensités.
$\rho + P_k$	71,6	374,8
ρ	126,75	663,05
$\rho + P_k$	71,7	375,3

Moyennes : $\rho + P_k = 375,05$
 — $\rho = 663,05$

$$i = \frac{25589}{38\ 57 + \lambda}$$

25622

25589

A moyen. 25605

D'un autre côté M. Favre a trouvé qu'un équivalent (32 kil.) de zinc amalgamé, dégage en se dissolvant dans l'acide sulfurique étendu, 48796 calories. Pour que mes forces électromotrices représentent le travail spécifique des actions chimiques qui le produisent, il me les faut donc multiplier par 0,7262, ou, ce qui reviendrait au même, prendre pour unité de résistance celle de 1^m,362 de mercure, au lieu de 1 mètre. En admettant pour un instant cette nouvelle unité, j'ai pour la formule de la pile de Smée :

$$i = \frac{48796}{\rho'}$$

$$i^2 \rho' = 48796 i.$$

Rappelons-nous maintenant que i représente l'intensité du courant, en prenant pour unité celui qui en une heure

dépose 0,108 milligrammes d'argent, ou dissout dans le même temps 0,032 milligrammes de zinc. 18796 i représente donc en billionnièmes de calorie la quantité de chaleur dégagée par heure dans la pile par le courant i . Cette quantité de chaleur se répartit sur toute la longueur de la résistance ρ ; en sorte que la quantité de chaleur déposée sur chaque unité de résistance ($1^m, 362$) est égale à

$$\frac{i^2}{4000000000} \text{ de calorie,}$$

et celle qui est déposée sur chaque unité normale de résistance (1 mètre de mercure), à

$$\frac{i^2}{1362000000},$$

Si j'en fais l'application au courant 663, le plus fort des expériences qui précèdent, je trouve les résultats suivants :

Consommation en zinc par heure.	21 milligr., 22
Chaleur totale déposée par heure dans tout le circuit, — en calorie.	0,0124
Chaleur déposée par heure dans chaque unité normale de résistance.	0,000321
Travail total produit par heure en kilogrammèt.	5,456

Une pile qui produirait avec un courant de même intensité un travail moteur primitif équivalent à un cheval vapeur devrait donc être formée de 19 500 éléments de Smée. Si du travail moteur primitif on passait au travail fourni par un électromoteur, il faudrait, pour obtenir une force d'un cheval vapeur, diviser ce nombre d'éléments par le rendement de la machine, ce qui, le rendement étant supposé égal à 0,20, donnerait le nombre énorme de 247 500 élé-

ments ; mais on peut obtenir de la pile de Smée des courants plus énergiques, ce qui réduit dans le même rapport le nombre d'éléments à employer.

L'adoption de mes unités permet de chiffrer ainsi de la manière la plus facile les principaux phénomènes de l'électricité, et de rendre plus de netteté et plus de corps aux données de cette science.

Je vais aborder maintenant les résultats auxquels je suis arrivé par l'usage de ces unités.

TROISIÈME MÉMOIRE.

De l'établissement des courants électriques dans les circuits bons conducteurs.

THÉORIE DES COURANTS ÉLECTRIQUES.

Les phénomènes attribués à l'électricité sont variés à l'infini : les uns sont produits par un mouvement électrique arrivé à son état permanent et y restant un temps indéfini ; les autres ne se manifestent que pendant que le courant naît ou meurt, que son intensité varie ou que change sa distance à l'objet qu'il influence directement ou indirectement. Les phénomènes mécaniques qui font plus spécialement l'objet de mes études sont précisément compris dans ce dernier cas. C'est donc à l'état variable qu'il m'importe le plus d'étudier les courants, et c'est aussi l'état qui est le moins connu.

Cet état variable se trouve, il est vrai, formulé par la théorie de Ohm : mais cette théorie, l'auteur le reconnaît lui-même, est fondée sur une hypothèse ; elle ne peut donc pas servir immédiatement de base à des évaluations numériques. Il faut d'abord qu'elle ait reçu la sanction de l'expérience interrogée non sur l'état permanent des courants, mais sur leur état variable ; non pas sur l'état variable dans un groupe spécial de corps mauvais conducteurs, mais dans tous les corps qui peuvent servir à la transmission des courants. Cette sanction étant supposée acquise, il faudrait encore déterminer la valeur des paramètres que renferme la formule de Ohm.

Cette vérification expérimentale n'a jamais été fournie d'une manière complète. M. Gaugain, il est vrai, l'a entreprise sur des corps mauvais conducteurs de l'électricité. La concordance qu'il signale entre ses résultats et ceux du calcul montre que dans ce cas l'hypothèse de Ohm est légitime ; que l'électricité, dans les corps mauvais conducteurs, se propage réellement comme la chaleur dans les corps athermanes. C'est là, sans doute, un fait important acquis à la science et un rapprochement nouveau et remarquable bien établi entre la chaleur et l'électricité ; mais la conséquence même de ce rapprochement est qu'il n'est pas permis de conclure à priori des corps mauvais aux corps bons conducteurs de l'électricité.

La *propagation* de la chaleur dans les barres métalliques n'est pas un fait de *transmission* simple, direct de cet agent, analogue à ce qui a lieu dans le vide ; c'est le résultat complexe de la participation de la matière pondérable au mouvement calorifique. Les lois de la *propagation* de la chaleur reçoivent de cette participation un caractère particulier qui n'appartient pas en propre à la *transmission* de la chaleur dans l'espace ; et par le fait, personne n'a songé à conclure des lois de cette propagation de la chaleur dans les barres aux lois de la transmission dans le vide ou dans les corps diathermanes. Ce que l'on ne fait pas pour la chaleur, on n'a pas le droit de le faire pour l'électricité, à moins que l'expérience ne vienne affirmer ce droit d'une manière directe.

Quelques mots d'explication sont ici nécessaires.

Un rayon de chaleur simple se transmet au travers de chaque corps diathermane avec une vitesse correspondante à l'indice de réfraction de cette substance pour ce rayon de chaleur. Il en est encore de même pour les corps athermanes ; seulement la chaleur s'éteint très rapidement dans ceux-ci, et quand ils sont complètement athermanes, la trans-

mission disparaît noyée dans le phénomène de propagation de molécule à molécule. Cette extinction de la chaleur n'est pas l'annihilation de la puissance vive du rayon calorifique, mais bien la transmission du mouvement aux particules du corps, quand ces particules peuvent vibrer à l'unisson du rayon de chaleur ou harmoniquement avec lui, auquel cas il y a production d'un effet thermométrique, chimique ou mécanique. Le mouvement ne se perd pas, il se transmet ou se transforme. Tout mouvement calorifique arrivant d'un milieu sur un autre est renvoyé dans le premier ou pénètre dans le second. Arrivé dans celui-ci, il peut rester confiné dans l'éther intra-particulaire, sans que les particules matérielles reçoivent son action ; dans ce cas le milieu est absolument diathermane. Le plus ordinairement les particules matérielles participeront dans une mesure plus ou moins large au mouvement calorifique ; dans ce cas, un rayon de chaleur, en pénétrant dans le milieu, y diminuera graduellement d'intensité d'une façon correspondante à la quantité totale de mouvement transmise aux particules pondérables. Plus la quantité de chaleur ainsi transmise, ou renvoyée dans le premier milieu, sera grande, moins le corps sera diathermane. Une conséquence de cette manière de voir est que, si l'on suppose qu'un rayon de chaleur homogène vienne à traverser un corps diathermane ordinaire, de l'eau par exemple, cette eau s'échauffera simultanément dans toute sa longueur avec une vitesse qui sera en chaque point en rapport avec l'intensité du rayon en ce point. Cet effet même sera indépendant de la conductibilité propre de l'eau. L'effet total sera la somme des effets dus à l'action directe du rayon de chaleur et à la conductibilité calorifique du corps. C'est à la prédominance de l'un de ces effets partiels sur l'autre qu'est due la diathermanéité ou l'athermanéité d'un corps quelconque.

A ce point de vue déjà, la possibilité d'étendre aux conducteurs métalliques les résultats obtenus par M. Gaugain sur les conducteurs imparfaits doit paraître fort douteuse. On arrive encore aux mêmes conclusions en partant d'un point de vue tout différent.

Imaginons que nous ayons deux réservoirs A et B d'une surface indéfinie, que le niveau de l'eau soit en A à un mètre au-dessus du niveau en B, et que ces deux réservoirs soient mis en communication par un canal découvert fermé à son orifice en B. L'eau se tiendra horizontale dans toute la longueur du canal et au même niveau qu'en A. A un certain moment nous débouchons brusquement le canal. L'écoulement commence au même instant, d'abord très rapide parce que la différence de charge est concentrée sur un court espace. L'abaissement de niveau se propage graduellement de B jusqu'en A avec une vitesse égale à la vitesse de propagation des ondes à la surface de l'eau, soit d'une fraction de mètre par seconde. L'établissement de la pente superficielle mettra pour s'effectuer un temps très appréciable, variant, comme l'indique la formule de Ohm, proportionnellement au carré de la longueur du canal et en raison directe des résistances dues aux frottements supposés uniformes dans toute la longueur de ce canal.

Au lieu d'un canal ouvert, imaginons que la communication des deux réservoirs ait lieu par une conduite cylindrique horizontale à section intérieure noyée. Nous n'aurons plus de surface libre. La conduite étant fermée en B, la pression de l'eau y sera la même dans toute sa longueur. Si nous l'ouvrons brusquement, la pression de l'eau diminuera brusquement aussi d'un mètre en B; mais aucun écoulement n'aurait lieu en cet instant, si l'eau et la conduite n'étaient pas douées d'une certaine élasticité. La diminution de pression se transmettra dans toute la longueur de la conduite

avec une vitesse de 1400 mètres par seconde, vitesse du son dans l'eau. C'est à la fin seulement de cette transmission que l'eau commencera à se mouvoir d'une manière sensible avec une vitesse qui croîtra suivant une loi facile à établir, connaissant la loi des frottements. La durée de l'état variable dans ce dernier cas sera essentiellement distincte de celle du cas précédent, et ses lois seront également tout autres. Or si la distribution des tensions de l'électricité à la surface des corps mauvais conducteurs est assimilable à la distribution des pentes dans un canal découvert, c'est à la distribution des pressions dans une conduite intérieurement noyée qu'il faudrait plutôt comparer l'état des conducteurs métalliques traversés par un courant électrique.

Ainsi donc, à quelque point de vue qu'on se place, et même après les expériences remarquables de M. Gaugain, l'hypothèse de Ohm attend encore sa sanction expérimentale. La question reste entière, car les lois de la pile entrevues par Ohm, ayant servi de point de départ à ses recherches analytiques, peuvent d'autant moins, par un retour en arrière, être invoquées à l'appui de cette hypothèse qu'elles découlent tout naturellement de considérations tout opposées à celles de Ohm.

Une autre objection à élever contre l'hypothèse de Ohm est la complication extrême des formules auxquelles elle conduit. Tant qu'il s'agit de corps mauvais conducteurs, la durée de l'état variable est assez considérable pour que l'on puisse à divers instants constater la situation des choses; mais quand on s'adresse à des corps bons conducteurs, c'est par millionnièmes de seconde qu'il faut compter la durée de l'état variable; il faut dès lors avoir recours à des artifices au travers desquels il est difficile de se guider par la formule de Ohm, sans tomber dans de très grandes difficultés analytiques et de très longs calculs. Or, comme les quantités à

mesurer sont très faibles, que l'expérience ne donne jamais que des approximations, il est impossible de préciser ce que devient la limite d'erreur à laquelle on doit s'arrêter.

Or l'électricité est aujourd'hui assez riche en faits pour que les phénomènes à étudier puissent être formulés d'une manière simple en dehors de toute hypothèse. J'ai donc laissé de côté la théorie de Ohm pour aborder la question par une voie plus expérimentale et moins encombrée de formules algébriques. Les faits n'en resteront pas moins ce qu'ils sont, et il nous sera plus facile de voir s'ils sont oui ou non d'accord avec la théorie en discussion.

Les données de l'expérience sur lesquelles je m'appuie sont les suivantes :

I.

Qu'il y ait transmission ou simplement propagation de l'électricité dans les circuits bons conducteurs, elle y a lieu dans un temps excessivement court, lorsque le circuit n'a que quelques mètres de longueur.

Les diverses expériences entreprises par les physiciens pour mesurer la vitesse de l'électricité ont conduit leurs auteurs aux résultats les plus divergents, sans qu'on puisse attribuer cette divergence à des erreurs d'observation. Les causes qui l'ont produite ressortiront, je l'espère, de la discussion qui termine ce mémoire; toutes ont eu pour effet de diminuer la vitesse observée en accroissant la durée de l'état variable du courant. Les expériences généralement considérées comme les plus exactes, parce qu'elles ont été faites le plus possible à l'abri des causes perturbatrices, les pratiques journalières de la télégraphie elle-même, montrent que c'est par cent milliardièmes de seconde qu'il faut compter le temps que met un courant pour franchir quelques mètres d'un fil bon conducteur.

II.

L'intensité d'un courant est proportionnelle, toutes choses égales d'ailleurs, à la vitesse du mouvement électrique qui le constitue, vitesse du mouvement qu'il ne faut pas confondre avec sa vitesse de transmission.

Au point de vue où j'envisage l'électricité dynamique, un courant est constitué par du mouvement, et l'intensité du courant est la mesure proportionnelle de la *quantité de mouvement* existant dans chaque unité de longueur du conducteur. La quantité de mouvement restant la même, la la vitesse du mouvement change avec la section du conducteur; mais si l'on admet que ce conducteur soit homogène et ait partout même section, ou que le circuit soit exprimé en fonction d'un fil de nature et de rayon constants, la masse électrique ne changeant plus, la vitesse restera proportionnelle à l'intensité du courant.

Pour les physiciens qui considèrent les courants comme formés par un ou même par deux fluides qui circulent dans leurs conducteurs, l'intensité du courant est proportionnelle à la *quantité d'électricité* qui circule; mais, bien qu'au fond ces deux manières d'envisager la question soient essentiellement différentes, comme ma définition s'applique également bien à la circulation d'un fluide et à un mouvement vibratoire analogue à celui qui constitue la lumière et la chaleur, et que conséquemment je ne préjuge rien sur ce point, elles conduisent en définitive à la même conclusion : dans un conducteur de section constante la quantité d'électricité mise en mouvement sera nécessairement proportionnelle à sa vitesse; à moins qu'on n'admette que le fluide électrique dans un circuit fermé peut avoir des densités variables, ce qui est une hypothèse inutile, contraire même aux

idées acceptées sur les fluides impondérables dont l'élasticité serait presque infinie.

III.

La résistance que le mouvement électrique éprouve de la part de ses conducteurs croît proportionnellement à la vitesse du mouvement ou à l'intensité du courant, toutes autres choses égales d'ailleurs.

Toutes les fois que l'on parle des conductibilités ou des résistances des conducteurs, on entend leurs conductibilités ou résistances relatives. Tous les procédés employés pour les évaluer ne peuvent conduire qu'à l'expression de ces rapports. Les résistances relatives sont indépendantes de l'intensité des courants, c'est un fait d'expérience. Il n'en est plus de même des résistances absolues; elles varient pour chaque conducteur avec l'intensité du courant. C'est ce qu'admet implicitement la théorie de Ohm, puisqu'elle pose en principe que la différence de charge qui détermine le passage d'un flux constant d'électricité entre deux sections d'un même conducteur situées à une distance constante l'une de l'autre varie en raison inverse de ces sections. C'est ce qui ressort d'ailleurs d'une manière directe des lois de la conductibilité des circuits métalliques ou liquides. Soient en effet s et s' les sections de deux parties successives d'un circuit formé par une substance homogène; r et r' les résistances de ces deux sections, résistances qui sont les mêmes sur toute l'étendue de chaque section; désignons de plus par i et i' les quantités d'électricité qui traversent chaque unité des deux sections pendant l'unité de temps. Nous aurons d'une part $\frac{i}{i'} = \frac{s'}{s}$, et de l'autre $\frac{r}{r'} = \frac{s'}{s}$, d'où $\frac{r'}{r} = \frac{i'}{i}$. Si donc j'ai deux sections égales d'un même conducteur traversées, l'une par une quantité i d'électricité, l'autre par

une quantité i' du même agent, les résistances au mouvement du fluide seront proportionnelles à i et i' , et par suite à v et v' , la densité du fluide restant constante. Au lieu de *quantités d'électricité*, je dirai *quantités de mouvement électrique*, et comme dans des conducteurs identiques la masse électrique est la même, je puis énoncer encore que la résistance d'un même conducteur est proportionnelle à la vitesse du mouvement qui s'y est établi.

IV.

Un mouvement électrique donné rencontre de la part de son conducteur supposé homogène une résistance proportionnelle à la longueur de ce conducteur.

Ce fait est une conséquence si directe des lois de la conductibilité des circuits, que je crois inutile d'insister.

Ces divers points établis, si je considère un élément quelconque $d\rho$ du circuit supposé homogène, que j'appelle γ l'accélération en ce point, et v' la vitesse du mouvement électrique au même point au bout d'un temps t compté à partir du moment où naît le mouvement, j'aurai

$$\frac{dv'}{dt} = \gamma - bv'd\rho.$$

γ sera elle-même une fonction du temps t , de la distance x du point $d\rho$ à l'origine de la force électromotrice et de la vitesse de transmission des pressions électriques dans le circuit, en sorte que mon équation différentielle sera en général assez compliquée; mais comme la vitesse de transmission de l'électricité est excessivement grande, si mon conducteur n'a que quelques mètres de longueur, je puis y considérer dans une première approximation la vitesse

comme infinie : l'erreur ne sera pas d'un millionième de seconde. Alors la masse électrique de mon conducteur commencera à se mouvoir simultanément dans toute son étendue, ou du moins la force accélératrice se répartira instantanément sur toute la longueur de la masse électrique à mouvoir. Si donc je désigne par m la masse électrique de l'unité de longueur de mon circuit supposé homogène, par ρ sa longueur totale, et par A la force électromotrice, l'accélération sera $\frac{A}{m\rho}$; la force résistante $b\rho v'$ donnera pour l'accélération due à la résistance $-\frac{b\rho v'}{m\rho} = -\frac{b}{m} v'$.

Mon équation différentielle devient donc

$$(1) \quad \frac{dv'}{dt} = \frac{A}{m\rho} - \frac{b}{m} v';$$

d'où, en intégrant de 0 jusqu'à t ,

$$(2) \quad v' = \frac{A}{b\rho} \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t}\right),$$

et par suite

$$(3) \quad i' = kmv' = \frac{mkA}{b\rho} \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t}\right).$$

Pour $t = \infty$

$$(4) \quad I = \frac{mk}{b} \frac{A}{\rho},$$

d'où

$$(5) \quad i' = I \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t}\right).$$

L'équation (4) montre que l'hypothèse de Ohm n'est en aucune façon nécessaire pour arriver aux lois de la pile telles que M. Pouillet les a démontrées par l'expérience.

Je ferai remarquer même que si l'on considère, ainsi que

je le fais, la pile fermée comme une machine en équilibre, il doit y avoir égalité entre la force motrice A et la force résistante $\alpha\rho i$, ce qui donne immédiatement :

$$A = \alpha\rho i,$$

$$i = \frac{A}{\alpha\rho},$$

$\alpha = \frac{b}{mk}$ dépendant des unités adoptées pour i , ρ et A .

Pour vérifier directement les lois de l'état variable, il faudrait pouvoir mesurer i' pour les diverses valeurs de t . Or i' a déjà atteint sa valeur permanente quand t atteint quelque dix-millième de seconde. Il m'a donc fallu chercher quelque détour.

Voici le principe de la méthode que j'ai suivie. Au lieu d'un seul courant, imaginons qu'au moyen d'une roue dentée formant interrupteur, je lance dans le circuit une série de courants de durée t , se succédant à des intervalles extrêmement rapprochés $t + t'$, et que dans le circuit soit compris un galvanomètre. La déviation de l'aiguille aimantée pourra devenir permanente, et cette déviation donnera la valeur du courant continu qui à lui seul produirait le même effet magnétique que la réunion des courants successifs. J'aurai donc la valeur moyenne de ceux-ci. Or de cette valeur moyenne je puis aussi avoir une expression algébrique.

En effet, si je multiplie les deux membres de l'équation (3) par dt , que j'intègre de 0 jusqu'à t et que je divise le produit de l'intégration par $t + t'$, le résultat obtenu représentera la valeur moyenne i_0 du courant variable pendant le temps $t + t'$.

Cette opération me donne

$$(6) \quad i_0 = \frac{1}{t+t'} \int_0^t i' dt = \frac{1t}{t+t'} - \frac{m}{b} \frac{1}{t+t'} \left\{ 1 - e^{-\frac{b}{m}t} \right\}.$$

Plusieurs difficultés se présentent ici.

1° Au moment où commence chaque interruption, le circuit renferme une certaine quantité de mouvement ou de puissance vive. Que devient-elle pendant la durée de cette interruption ? Persiste-t-elle en entier jusqu'au retour du courant suivant, ou s'épuise-t-elle en totalité sous l'effort des résistances pendant la durée de cette interruption ? J'ai fait successivement ces deux hypothèses extrêmes. Nous verrons que la dernière est seule admissible dans mes expériences. L'une et l'autre d'ailleurs me conduisent aux mêmes conclusions générales ; la valeur numérique de $\frac{b}{m}$ est seulement double dans l'un des cas que dans l'autre.

2° Lorsque la pile est forte, et surtout lorsque le circuit est replié sur lui-même, on voit apparaître une petite étincelle au moment de la rupture du circuit ; le courant se continue donc un instant après l'interruption de la continuité métallique. L'accroissement notable de résistance qui résulte du passage du courant au travers de l'air affaiblit dans une proportion correspondante l'intensité de ce courant par continuation ; mais il n'en résulte pas moins une complication qu'il faut écarter en évitant la production de cette étincelle.

3° Ma formule (6) contient quatre inconnues, dont deux sont faciles à déterminer : I est l'intensité du courant permanent que l'on mesure à la boussole en arrêtant l'interrupteur ; $t + t'$ est la durée d'un contact et d'une interruption réunis : cette valeur se déduit de la vitesse de rotation de l'interrupteur. L'évaluation de ces deux quantités ne présente donc aucune difficulté sérieuse. Il n'en est plus de même de t . On peut bien, il est vrai, mesurer exactement sur l'interrupteur le rapport du plein au vide, mais ce rapport est changé dans la pratique par la forme, variable par l'usure, du ressort qui appuie sur les dents de la roue dentée.

t doit donc être déterminé par les données mêmes de l'expérience en même temps que $\frac{b}{m}$, et par conséquent il me faut deux équations.

Voici donc comment j'ai opéré.

L'interrupteur dont je me suis servi est semblable à celui dont M. Pouillet a fait usage dans son travail sur la mesure des quantités d'électricité dont il donne un résumé, tome I, page 644, de son *Traité de physique* (6^e édit.). Pour éviter les vibrations du ressort, le pourtour de ma roue était lisse, les intervalles des dents ayant été remplis par de l'ivoire, et ultérieurement par du buis ; de plus le ressort était pressé légèrement sur presque toute sa longueur par une lame de feutre épais. En modifiant la forme du ressort et sans rien changer à la roue, je pouvais faire varier le rapport des durées des contacts et des interruptions. L'usure du ressort altérerait du reste assez rapidement ce rapport, ainsi que je l'ai déjà dit plus haut.

Cet interrupteur était mis en mouvement par un électromoteur qu'animait une pile à part dont je modifiais à mon gré l'intensité. La vitesse de ma roue pouvait ainsi être maintenue constante pendant très longtemps ou être changée à volonté dans des limites assez étendues. Cette vitesse était mesurée au moyen d'un chronomètre et d'une vis sans fin taillée dans l'arbre de la roue et engrenant avec une roue dentée munie d'une aiguille.

Le pôle positif d'une pile constante communiquait avec l'un des bouts du fil de ma boussole, dont l'autre bout était lié au ressort de l'interrupteur ; le pôle négatif de la pile aboutissait à l'axe de l'interrupteur. Par cette disposition, chaque fois que le ressort appuyait sur une dent métallique, le circuit se trouvait fermé ; il était ouvert, au contraire, chaque fois que le ressort passait sur une dent de bois ou

d'ivoire. C'est à cette disposition de l'appareil que se rattache l'équation (6). Le circuit dans le premier état était toujours très court et sans replis, pour éviter l'apparition des étincelles à la rupture. J'appelle ρ sa résistance totale ramenée à l'unité.

Pour obtenir une seconde relation entre les données à déterminer, je reliais le ressort à l'axe de la roue au moyen d'une résistance additionnelle ρ' dont je faisais varier la nature à mon gré. Lorsque le ressort appuyait sur une dent métallique, le courant se partageait entre la roue elle-même et la résistance ρ' ; mais comme cette dernière était toujours incomparablement plus forte que l'autre, il n'en résultait aucun accroissement sensible dans l'intensité du courant produit et accusé par la boussole. Au contraire, lorsque le ressort passait sur une dent de bois, le circuit, au lieu d'être interrompu, se trouvait seulement accru dans le rapport de $\frac{\rho + \rho'}{\rho}$. A chaque changement dans la nature des contacts,

l'intensité du courant permanent passait donc de $I = \frac{mk\Lambda}{b\rho}$

à $I' = \frac{mk\Lambda}{b\rho + \rho'}$, et réciproquement; tandis que dans la résistance

additionnelle ρ' qui se trouvait former un circuit fermé en dehors de la pile et de la boussole, à chaque contact métallique l'intensité du courant permanent variait de 0 à

$I' = \frac{mk\Lambda}{b\rho + \rho'}$, ou réciproquement. Je vais appliquer le calcul

à cette seconde disposition des expériences.

PREMIER TEMPS. — Le contact ayant lieu sur une dent métallique, je reprends mon équation (4).

$$(7) \quad \frac{dv'}{dt} = \frac{A}{m\rho} - \frac{b}{m} v'.$$

Seulement, au lieu de faire $v' = 0$ à l'origine du contact

pour déterminer la constante arbitraire de l'intégration, je ferai à ce moment $v' = v''$, v'' étant la vitesse acquise à la fin du contact sur bois et au commencement du contact sur métal. Il vient alors :

$$(8) \quad v' = \frac{A}{b\rho} \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t}\right) + v'' e^{-\frac{b}{m}t}$$

$$kmv' = i' = \frac{mkA}{b\rho} \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t}\right) + kmv'' e^{-\frac{b}{m}t}$$

$$(9) \quad i' = I \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t}\right) + i'' e^{-\frac{b}{m}t}.$$

La valeur moyenne de ce courant variable pendant la durée de temps $t + t'$ s'obtiendra comme précédemment, et a pour expression :

$$(10) \quad I_t = \frac{It}{t + t'} - \frac{m}{b} \frac{I - i''}{t + t'} \left\{1 - e^{-\frac{b}{m}t}\right\}.$$

A la fin de ce temps t , la quantité de mouvement contenue dans la longueur ρ du circuit est

$$m\rho v' = \frac{m}{b} A \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t}\right) + m\rho v'' e^{-\frac{b}{m}t}.$$

DEUXIÈME TEMPS. — Pendant la deuxième phase, le mouvement est produit par la force électromotrice A , à laquelle s'ajoute la quantité de mouvement électrique $m\rho v'$ existant déjà dans la portion ρ du nouveau circuit $\rho + \rho'$, et dont il faut retrancher la résistance au mouvement électrique. La force motrice est donc :

$$(11) \quad A + m\rho (v' - v'') - b(\rho + \rho')v''.$$

L'accélération devient :

$$(12) \quad \frac{dv''}{dt'} = \frac{A}{m(\rho + \rho')} - \frac{\rho}{\rho + \rho'} (v' - v'') - \frac{b}{m} v''.$$

D'où je déduis :

$$(13) \quad v'' = \frac{\left(\frac{A + m\rho v'}{m(\rho + \rho')} \right)}{\left(\frac{\rho}{\rho + \rho'} + \frac{b}{m} \right)} \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{\rho}{\rho + \rho'} + \frac{b}{m} \right) t} \right\}$$

et en mettant pour v' sa valeur :

$$(14) \quad v'' = \frac{A \left\{ 1 + \frac{m}{b} \left(1 - e^{-\frac{b}{m} t} \right) \right\} + m\rho v'' e^{-\frac{b}{m} t}}{b(\rho + \rho') + m\rho} \left\{ 1 - e^{-\frac{m\rho + b(\rho + \rho')}{m(\rho + \rho')} t} \right\}.$$

L'usage de cette dernière formule est assez compliqué ; mais nous savons à l'avance que la durée de la période variable d'un courant est excessivement courte ; je pouvais donc dans une première approximation, supposer $e^{-\frac{b}{m} t} = 0$, tirer de mes formules une première valeur approchée de $\frac{b}{m}$, substituer cette valeur dans l'expression $e^{-\frac{b}{m} t}$, et, par seconde approximation, calculer la nouvelle valeur de $\frac{b}{m}$, et continuer ainsi jusqu'à ce que la dernière ne diffère pas d'une manière sensible de la précédente.

Je suppose donc $e^{-\frac{b}{m} t} = 0$, et par suite $m\rho$ négligeable devant $b(\rho + \rho')$, ainsi que $\frac{b}{m}$ devant l'unité. J'ai alors :

$$(15) \quad v'' = \frac{A}{b(\rho + \rho')} \left(1 - e^{-\frac{b}{m} t} \right),$$

$$(16) \quad i'' = kmv'' = \frac{mkA}{b\rho + \rho'} \left(1 - e^{-\frac{b}{m} t} \right) = I' \left(1 - e^{-\frac{b}{m} t} \right)$$

et enfin pour la valeur moyenne de ce courant pendant la durée $t + t'$:

$$(17) \quad I'_t = \frac{I't'}{t+t'} - \frac{m}{b} \frac{I'}{t+t'},$$

et d'autre part (10) :

$$(18) \quad I_t = \frac{It}{t+t'} - \frac{m}{b} \frac{I-I'}{t+t'}.$$

La succession des deux courants moyens I_t et I'_t donnera donc en définitive un courant résultant moyen :

$$(19) \quad I_o = I_t + I'_t = \frac{It + I't'}{t+t'} - \frac{m}{b} \frac{I}{t+t'}.$$

Par les mêmes abréviations l'équation (6) devient :

$$(20) \quad i_o = \frac{It}{t+t'} - \frac{m}{b} \frac{I}{t+t'}.$$

I , I' , i_o , I_o et $t + t'$ étant fournis par l'expérience, les deux équations (19) et (20) me donneront t , t' et $\frac{m}{b}$. J'en déduis :

$$(21) \quad \frac{b}{m} = \frac{I'}{(t+t') \left\{ \frac{I'}{I} (I - i_o) + i_o - I_o \right\}}.$$

Toute mon attention s'est donc portée sur l'évaluation numérique de ces cinq données : $t + t'$, I' , I , i_o et I_o .

Les plus grandes difficultés dans ces déterminations ont pris leur source dans les variations quelquefois incessantes de la déclinaison ; un grand nombre même ont dû être rejetées pour cette cause : je n'ai conservé que celles pendant lesquelles la boussole a gardé un peu de calme. Je remarquerai d'ailleurs que dans des expériences où, quoi qu'on fasse, tout est mobile, le zéro de la boussole, l'intensité de la pile, le rapport de t à t' , on ne peut guère compter sur des moyennes entre des résultats obtenus dans des conditions nécessairement différentes et soumises cha-

cune à sa loi. Chaque série d'expériences, au contraire, doit durer le moins de temps possible, et ne doit être faite qu'au moment où la variation des quantités inconstantes est la plus faible. Tout résultat obtenu dans des conditions autres est nécessairement entaché d'erreur.

Voici l'ordre que j'ai suivi dans chaque série :

1° Je déterminais le zéro de la boussole.

2° La résistance ρ' étant en place, je mesurais I, puis I', en appuyant le ressort d'abord sur métal, puis sur bois.

3° J'enlevais alors le fil ρ' qui réunissait la roue dentée avec son ressort, je mettais l'interrupteur en mouvement, et je mesurais l'intensité moyenne i_a du courant obtenu.

4° Je rétablissais la résistance additionnelle ρ' , et je mesurais l'intensité moyenne I_a du courant obtenu.

5° J'arrêtai l'interrupteur, je mesurais I', puis I.

6° Enfin je vérifiais mon zéro, qui ne devait pas avoir changé, non plus que I et I'.

Voici maintenant les résultats auxquels je suis arrivé.

PREMIÈRE SÉRIE. — *Cuivre.*

A l'exception de la pile, le circuit jusqu'à l'interrupteur est formée par des fils de cuivre étalés sur les murs ou sur le sol, de manière qu'aucune de ses parties ne puisse agir par induction sur les autres. La résistance ρ' , qui est restée la même dans les dix expériences qui suivent, était formée par un fil de platine de 0^m,80 de long.

Longueur du fil de cuivre, 12 mètres.

$$\text{Température, } \theta = 14^{\circ} \quad t + t' = \frac{1''}{320}.$$

$$\left. \begin{array}{l} I = 280,5 \\ I' = 109,8 \\ i_a = 44,1 \\ I_a = 134,9 \end{array} \right\} \frac{b}{m} = 20600.$$

Si je transporte cette valeur de $\frac{b}{m}$ dans l'expression $e^{-\frac{b}{m}t}$, et que je mette pour t sa valeur déduite de l'équation (20),

$$\frac{t}{t+t'} = \frac{i_0}{I} + \frac{m}{b} \frac{I}{t+t'},$$

il vient

$$e^{-\frac{b}{m}t} = 10^{-4} = \frac{1}{10000}.$$

L'erreur commise en négligeant ce terme exponentiel est donc égale à $\frac{I'}{10000} = 0,01098$. Les erreurs commises en négligeant $\frac{m}{b}$ devant l'unité et $m\rho$ devant b ($\rho + \rho'$) sont au plus du même ordre, et comme je ne puis pas répondre des valeurs de I , I' , i_0 et I_0 à un dixième près, les quantités négligées sont dix fois plus faibles que les erreurs inévitables de l'expérience. En appliquant la même discussion à $\frac{b}{m}$, je trouve que je ne puis qu'exceptionnellement répondre des deux premiers chiffres. J'ai cependant poussé le calcul jusqu'au troisième.

DEUXIÈME SÉRIE. — *Cuivre.*

Même fil de cuivre.

$$\theta = 44^\circ \quad t + t' = \frac{A''}{320}.$$

$$\left. \begin{array}{l} I = 280,54 \\ I' = 109,85 \\ i_0 = 46,2 \\ I_0 = 136,2 \end{array} \right\} \frac{b}{m} = 20600.$$

TROISIÈME SÉRIE. — *Plomb.*

Le fil de cuivre est remplacé par un fil de plomb nu étalé sur le parquet.

Longueur du fil, 6 mètres.

$$\theta = 14^{\circ},2 \quad t + t' = \frac{1}{420}.$$

$$\left. \begin{array}{l} I = 310 \\ I' = 113,1 \\ i_o = 80,8 \\ I_o = 164,9 \end{array} \right\} \frac{b}{m} = 19000.$$

QUATRIÈME SÉRIE. — *Fer.*

Le fil de plomb est remplacé par un fil de fer fin nm, soutenu en l'air par des supports isolants.

Longueur du fil, 10 mètres.

$$\theta = 14^{\circ},2 \quad t + t' = \frac{1}{420}.$$

$$\left. \begin{array}{l} I = 136 \\ I' = 77,9 \\ i_o = 36,84 \\ I_o = 91,95 \end{array} \right\} \frac{b}{m} = 19400.$$

CINQUIÈME SÉRIE. — *Dissolution de sulfate de cuivre.*

Le fil de fer a été remplacé par une dissolution étendue de sulfate de cuivre dans l'eau, et dans laquelle plongeait deux lames de cuivre.

Écart des lames, 0^m,02.

$$\theta = 14^{\circ},1 \quad t + t' = \frac{1}{428}.$$

$$\left. \begin{array}{l} I = 314,7 \\ I' = 114,2 \\ i_o = 94,8 \\ I_o = 172,0 \end{array} \right\} \frac{b}{m} = 18700.$$

Les résultats suivants feront apprécier la limite d'exactitude que comportent ces expériences.

SIXIÈME SÉRIE. — *Fil de platine.*

La dissolution du sulfate de cuivre a été remplacée par un fil de platine fin tendu lâchement dans un tube rempli d'eau, sans être revêtu d'une couche isolante.

Longueur du fil, 4^m,8.

$$\theta = 14^\circ \quad t + t' = \frac{4}{320}.$$

$$\left. \begin{array}{l} I = 350,84 \\ I' = 419,34 \\ i_0 = 60,8 \\ I_0 = 137,3 \end{array} \right\} \frac{b}{m} = 18200.$$

SEPTIÈME SÉRIE. — *Même fil, même disposition.*

$$\theta = 14^\circ \quad t + t' = \frac{4}{320}.$$

$$\left. \begin{array}{l} I = 354,0 \\ I' = 419,4 \\ i_0 = 62,4 \\ I_0 = 138,4 \end{array} \right\} \frac{b}{m} = 17400.$$

Moyenne de ces deux expériences : $\frac{b}{m} = 17800.$

HUITIÈME SÉRIE. — *Platine.*

Le fil de platine a été remplacé par un bout de même grosseur, mais long de 6 mètres, également plongé nu dans de l'eau.

$$\theta = 14^\circ \quad t + t' = \frac{4}{320}.$$

$$\left. \begin{array}{l} I = 407,4 \\ I' = 67,6 \\ i_0 = 47,2 \\ I_0 = 72,67 \end{array} \right\} \frac{b}{m} = 17600.$$

NEUVIÈME SÉRIE. — *Même fil, même disposition que dans la huitième.*

$$\theta = 14^{\circ} \quad t + t' = \frac{1''}{320}.$$

$$\left. \begin{array}{l} I = 407,4 \\ I' = 67,6 \\ i_0 = 17,4 \\ I_0 = 72,84 \end{array} \right\} \frac{b}{m} = 48800.$$

Moyenne des expériences VIII et IX : $\frac{b}{m} = 48200$.

Les deux dernières expériences sont surtout intéressantes en ce qu'une différence de 0,2, presque la limite de précision dans l'évaluation de i_0 , fait monter la valeur de $\frac{b}{m}$ de 17 600 à 18 800. Je ferai remarquer toutefois que la valeur de i_0 étant plus élevée dans les expériences précédentes, un semblable écart y a moins d'importance. Quoi qu'il en soit, le second chiffre est le seul dans lequel on puisse avoir quelque confiance.

Ces résultats sont réunis dans les tableaux suivants :

TABLEAU I.

Conducteur.	Longueur du conducteur.	Valeur de I.	Nombre d'interruptions par seconde.	Valeur de $\frac{b}{m}$.
Cuivre.	12 m.	280,5	320	20600
»	12	280,5	320	20600
Fer.	40	136,0	420	19400
Plomb.	6	310	420	19000
Sulfate de cuivre.	0,02	314,7	428	18700
Moyenne.				19700

TABLEAU II.

Platine	6 m.	407,4	320	47600	} 18200
»	6	407,4	320	48800	
»	4,8	350,8	320	49200	} 47800
»	4,8	354,0	320	47400	
Moyenne.					48000

L'hypothèse de Ohm conduit, pour l'intensité u du courant pendant son état variable, à la formule

$$u = \frac{\alpha}{2l} x + \alpha \Sigma \left\{ \frac{1}{i} \sin \frac{i\pi (l + \alpha)}{l} e^{-\frac{k\pi^2 i^2 t}{l^2}} \right\}$$

dans laquelle j'ai conservé la notation de l'auteur. D'après cette formule, la durée t de l'état variable devrait varier proportionnellement au carré de la longueur l du circuit et en raison inverse de la conductibilité k' de ce circuit; c'est-à-dire en raison inverse du produit de la longueur réduite et de la longueur vraie du circuit. Rien de pareil ne s'est présenté dans mes expériences. La durée de l'état variable y est au contraire restée à peu près constante, ainsi que $\frac{b}{m}$. L'état variable, en effet, dans ma théorie, est donné par la formule (5) :

$$i' = 1 \left(1 - e^{-\frac{b}{m} l} \right).$$

Si l'on voulait tenir compte des variations de $\frac{b}{m}$, il arriverait que, $\frac{b}{m}$ diminuant avec la longueur du conducteur, la durée t de l'état variable serait au contraire d'autant plus grande que le conducteur serait plus court. Cette conclu-

sion, je crois, serait erronée. En dehors des causes que j'ai signalées plus haut, il en est d'autres dont l'influence est énorme. Je n'en citerai pour le moment qu'un seul exemple.

DIXIÈME SÉRIE.

Le fil de platine des séries VI et VII a été replié sur une étendue égale environ au quart de sa longueur autour d'un tube de verre sur lequel il formait une seule épaisseur de spires.

$$\theta = 14^{\circ},9 \quad t + t' = 0'',00493.$$

$$I = 364$$

$$I' = 454,9$$

$$i_0 = 476,6$$

$$I_0 = 246,7$$

$$\frac{b}{m} = 8200$$

La durée de l'état variable est devenue plus de deux fois plus grande. La valeur de $\frac{b}{m}$ est également notablement plus faible pour le platine qui plonge dans l'eau sans enveloppe isolante, que pour les autres conducteurs, quoique je me sois assuré que le courant ne quitte pas le platine. Malgré toutes mes précautions et à cause de l'espace restreint dans lequel j'opérais, l'influence de toutes ces causes perturbatrices suffirait pour expliquer les différences qui précèdent. Je considère donc pour le moment $\frac{b}{m}$ comme constant, indépendant de la longueur du circuit, pourvu que le circuit soit rectiligne, soustrait à l'influence des corps voisins, et que sa longueur soit assez courte pour que la transmission des pressions s'y fasse dans un temps inappréciable.

En prenant pour $\frac{h}{m}$ le nombre rond 20 000 très approché de la vérité, il vient :

$$i' = I(1 - e^{-20000t}),$$

ou bien

$$i' = I(1 - 10^{-8700t}).$$

Le courant n'arrive donc à sa valeur normale, à *un millième près*, qu'au bout d'un temps égal à $\frac{1}{3000}$ de seconde environ.

Cette formule diffère de celle que j'ai donnée dans le résumé de mes recherches sur l'électricité. C'est que mes premiers calculs étaient basés sur l'hypothèse qu'un courant, au moment où il s'établit dans un circuit, même rectiligne, développe dans ce circuit un courant induit inverse qui affaiblit d'autant le courant direct considéré comme ayant dès le début toute sa valeur. Mon équation différentielle primitive était alors

$$i' = I - \frac{\alpha}{\rho} \frac{di'}{dt},$$

d'où

$$\frac{di'}{dt} = \frac{\rho}{\alpha} (I - i').$$

Dès mes premières expériences je fus conduit à considérer, dans le facteur $\frac{\rho}{\alpha}$, α comme devant être de la forme $\frac{\alpha' \rho}{I}$, ce qui transformait mon équation différentielle en la suivante :

$$\frac{di'}{dt} = \frac{I}{\alpha'} (I - i'),$$

d'où

$$i' = I(1 - e^{-\frac{It}{\alpha'}}).$$

Mais le désaccord entre la théorie et l'expérience ne tarda pas à se montrer et à croître. Il devint tel, que je dus renoncer à m'appuyer sur les courants induits et aborder la question du point de vue purement mécanique.

Pour Ohm et les physiciens qui admettent sa manière de voir, il n'y a pas de vitesse, à proprement parler, pour l'électricité. Il en existe une au contraire pour moi. Seulement, pour trouver sa valeur exacte, il est nécessaire de dégager des expériences l'influence de l'inertie électrique des conducteurs.

Les principales expériences faites en vue de mesurer la vitesse de l'électricité sont dues à MM. Wheatstone, Fizeau et Gounelle, Guillemin.

Les expériences de M. Wheatstone ont été faites avec l'électricité statique d'une batterie. Le passage du courant produit était accusé à l'œil par l'étincelle. Le courant ainsi rendu visible pendant toute sa durée se trouvait par cela même soustrait à l'influence de l'état variable et de l'inertie électrique. La vitesse de 461 000 kilomètres donnée par Wheatstone doit donc être vraie dans la limite de précision de ses expériences. Malheureusement cette limite est assez vague. L'écart de l'image centrale a été évalué par M. Wheatstone *approximativement à un demi-degré*. Une erreur d'un quart en moins sur cette évaluation serait très admissible, ce qui descendrait la vitesse à 350 000 kilomètres par seconde, vitesse de la lumière.

La vitesse trouvée par MM. Fizeau et Gounelle pour le cuivre est de 180 000 kilomètres. Mais ce nombre doit subir deux corrections. Il résulte en effet des expériences de ces deux physiciens que le mouvement électrique, comme le mouvement sonore, se réfléchit en arrière sur lui-même. Les ondes électriques qu'ils lançaient dans leurs fils s'étaient de plus en plus, en sorte que les ondes successives, au lieu de

rester distinctes, séparées par un repos, se fondaient graduellement l'une dans l'autre. Cet effet, je crois, devrait plutôt être attribué à la persistance du mouvement après la cessation de la cause qui le produit, jusqu'à ce que ce mouvement soit éteint en chaque point du circuit par les résistances qu'il y rencontre. Quelle que soit la cause, l'effet sera toujours de retarder l'apparition du maximum de mouvement électrique d'une quantité qui, par la nature même du procédé employé, a dû être du tiers environ de la durée observée. Or, d'après les données de MM. Fizeau et Gounelle, le temps nécessaire pour que l'onde électrique atteigne son maximum au bout d'un fil de cuivre de 288 kilomètres serait de $\frac{4''}{625}$. Si de ce temps on retranche d'abord $\frac{4''}{3000}$, temps nécessaire pour qu'un courant atteigne à 0,001 près à son état permanent en chaque point du circuit, il reste $\frac{4''}{790}$. Si de ce reste je retranche encore le tiers de sa valeur, il reste $\frac{4''}{4180}$, qui correspond à une vitesse de 340 000 kilomètres par seconde, ce qui est encore à peu près la vitesse de la lumière.

Les expériences de MM. Guillemin et Burnouf conduisent encore aux mêmes résultats. Il en est tout autrement des nombres auxquels sont arrivés MM. Mitchell, Walker, Gould, les astronomes de Greenwich et d'Édimbourg sur un fil aérien, et les astronomes de Greenwich et de Bruxelles sur un fil en grande partie plongé dans la mer.

Je rappelle ici ces résultats :

	kilom.
Mitchell.	45 600 fer.
Walker.	30 000 .
Gould.	25 000 .
Astronomes Greenwich et Edimbourg. . . .	12 200 cuivre.
Astronomes Greenwich et Bruxelles. . . .	4 300 .

Les expériences faites sur les fils de lignes télégraphiques sont soumises à des causes d'erreur très nombreuses et surtout très importantes, parmi lesquelles je citerai en premier lieu l'imperfection de l'isolement. Le 2 du mois de mai, deux voltamètres furent posés aux deux extrémités d'un même fil allant de Paris à Saint-Cloud. Le courant d'une pile installée à la gare de Saint-Lazare, par les soins de M. Noblet, passait par le premier voltamètre, allait à Saint-Cloud par le fil de ligne, traversait le second voltamètre, et faisait retour par le sol. Après huit jours d'un courant continu par un temps toujours beau, la quantité de cuivre déposé dans le voltamètre de Paris a été trouvée de 4^{gr},325, tandis que dans le voltamètre de Saint-Cloud elle n'était que de 4^{gr},117, ce qui accuse une perte de $\frac{1}{25}$. On a donc affaire à des circuits en partie bons, en partie mauvais conducteurs, et la durée de l'état variable peut en être troublée d'une manière sensible, mais dont il ne faudrait cependant pas s'exagérer l'importance. Cette durée, par contre, est considérablement accrue quand une portion du circuit est repliée sur elle-même, et bien plus encore lorsque dans la spirale formée par le conducteur se trouve placé un noyau de fer doux. L'état variable est alors tellement prolongé, que la durée de la transmission du courant disparaît complètement devant elle. De là les vitesses insignifiantes obtenues par MM. Mitchell, Walker, Gould et par les astronomes de Greenwich, Édimbourg et Bruxelles.

Afin de légitimer cette assertion et de montrer jusqu'où s'étend cette influence des circonvolutions du fil, je vais extraire quelques résultats d'un travail où cette question est traitée dans son ensemble, et qui fera l'objet du troisième fascicule de mes Mémoires.

La méthode expérimentale est restée la même, avec cette

différence que la résistance additionnelle ρ' , au lieu d'être rectiligne ou à très larges replis, était enroulée en spires pressées sur deux bobines de cuivre dans l'axe desquelles on pouvait introduire à volonté un noyau de fer doux en fer à cheval avec ou sans armature.

La méthode de calcul est également restée la même, si ce n'est que j'ai mis en évidence le terme relatif à l'influence des circonvolutions du circuit.

PREMIER CAS. — *L'interruption est complète et ρ' enlevé.*

Rien n'étant changé dans ce cas, j'ai encore :

$$(5) \quad i' = I \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t} \right).$$

$$(6) \quad i_0 = I \frac{t}{t+t'} - \frac{m}{b} \frac{I}{t+t'} \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t} \right),$$

et en supposant

$$e^{-\frac{b}{m}t} = 0,$$

$$(20) \quad i_0 = I \frac{t}{t+t'} - \frac{m}{b} \frac{I}{t+t'}.$$

DEUXIÈME CAS. — *L'interruption est incomplète et ρ' mis en place.*

PREMIER TEMPS. — Le contact a lieu sur une dent métallique. Si j'appelle encore v' la vitesse du mouvement électrique au bout du temps t compté à partir du moment où commence le contact métallique, et v'' la vitesse de ce mouvement à la fin du contact sur bois, j'ai pareillement :

$$(7) \quad v' = \frac{A}{b\rho} \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t} \right) + v'' e^{-\frac{b}{m}t}$$

et posant comme précédemment

$$kmv' = i', \quad kmv'' = i'', \quad \frac{kmA}{b\rho} = I,$$

$$(9) \quad i' = I \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t} \right) + i'' e^{-\frac{b}{m}t}$$

$$(10) \quad I_t = \frac{It}{t+i'} - \frac{m}{b} \frac{I-i''}{t+i'} \left\{ 1 - e^{-\frac{b}{m}t} \right\},$$

et en supposant

$$(20) \quad e^{-\frac{b}{m}t} = 0,$$

$$I_t = \frac{It}{t+i'} - \frac{m}{b} \frac{I-i''}{t+i'}.$$

A la fin du temps t , la quantité de mouvement contenue dans la longueur ρ du circuit est :

$$(24) \quad m_{\rho v'} = \frac{m}{b} \Lambda \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t} \right) + m_{\rho v''} e^{-\frac{b}{m}t}.$$

DEUXIÈME TEMPS. — Le contact a lieu sur une dent de bois, et le courant s'installe dans la portion additionnelle ρ' du circuit.

La force motrice se compose alors de la force électromotrice Λ et de la quantité de mouvement en excès restant dans le circuit primitif m_{ρ} ($v'-v''$). La force résistante se compose elle-même de deux parties, la résistance du circuit total $b(\rho + \rho')$ v'' supposé rectiligne, et la résistance extérieure provenant de l'action des spires et du fer doux. La portion ρ' du circuit étant en entier enroulée sur elle-même, je représente cette force résistante par $cm_{\rho'} \frac{dv'}{dt}$, parce qu'elle dépend à chaque instant, non de l'intensité $km_{\rho'}$ du courant à cet instant, mais de la variation $km \frac{dv'}{dt}$ que subit cette intensité. A la place de ρ' , longueur réduite du fil spiral, c'est sa longueur vraie l que je devrais mettre; mais cette substitution compliquerait les formules par l'introduction de

conductibilités variables, et en définitive toute l'influence de cette substitution se reportera sur le coefficient c , où je pourrai toujours la retrouver. J'aurai donc pour l'accélération :

$$(22) \quad \frac{dv''}{dt} = \frac{A}{m(\rho + \rho')} + \frac{\rho(v' - v'')}{\rho + \rho'} - \frac{b}{m} v'' - \frac{c\rho'}{\rho + \rho'} \frac{dv''}{dt},$$

$$(23) \quad 1 + c \frac{\rho'}{\rho + \rho'} \frac{dv''}{dt} = \frac{A + m\rho v'}{m(\rho + \rho')} - \left(\frac{\rho}{\rho + \rho'} + \frac{b}{m} \right) v'',$$

$$(24) \quad v'' = \frac{\frac{A + m\rho v'}{m(\rho + \rho')}}{\frac{\rho}{\rho + \rho'} + \frac{b}{m}} \left\{ A = e^{-\left(\frac{\rho}{\rho + \rho'} + \frac{b}{m} \right) t} \right\}$$

En négligeant comme précédemment $\frac{\rho}{\rho + \rho'}$, devant $\frac{b}{m}$ et posant $1 + c \frac{\rho'}{\rho + \rho'} = d$, il vient :

$$(25) \quad v'' = \left\{ \frac{A}{b(\rho + \rho')} + \frac{m}{b} \frac{\rho v'}{\rho + \rho'} \right\} \left\{ 1 - e^{-\frac{b}{md} t} \right\}.$$

Si maintenant je multiplie par m , que je pose $kmv'' = i''$, $\frac{kmA}{b\rho + \rho'} = I'$, et que dans l'expression $\frac{kmv'\rho}{\rho + \rho'}$ je remplace kmv' par sa valeur $\frac{kmA}{b\rho}$ tirée de l'équation (7), dans laquelle j'ai fait $e^{-\frac{b}{m}t} = 0$, il vient d'abord :

$$\frac{kmv'\rho}{\rho + \rho'} = \frac{km}{b} \frac{A}{\rho + \rho'} = I',$$

et par suite,

$$(26) \quad i'' = I' \left(1 + \frac{m}{b} \right) \left\{ 1 - e^{-\frac{b}{md} t} \right\}.$$

L'intensité moyenne de ce courant variable pendant le temps t' sera :

$$(27) \quad I'_t = \Gamma \left(1 + \frac{m}{b} \right) - \frac{md}{b} \left(1 + \frac{m}{b} \right) \frac{I'}{t'} \left\{ 1 - e^{-\frac{md}{b}t'} \right\},$$

et en supposant également que les interruptions soient assez lentes pour que $e^{-\frac{md}{b}t'} = 0$ à la fin du temps t' que dure le contact sur bois, et négligeant $\frac{m}{b}$ devant l'unité,

$$(28) \quad I'_t = I' \left(1 - \frac{md}{bt'} \right) = I' - \frac{md}{b} \frac{I'}{t'};$$

dans les mêmes conditions,

$$(29) \quad I_t = I - \frac{m}{b} \frac{I - I'}{t}.$$

Ce qui donne pour l'intensité moyenne de l'effet obtenu à la boussole par la succession de ces courants incomplètement interrompus :

$$(30) \quad I_o = \frac{I_t t + I'_t t'}{t + t'} = \frac{I t + I' t'}{t + t'} - \frac{m}{b} \frac{I - I'}{t + t'} - \frac{md}{b} \frac{I'}{t + t'},$$

à quoi il faut joindre

$$(31) \quad i_o = I \frac{t}{t + t'} - \frac{m}{b} \frac{I}{t + t'}$$

Ces deux dernières équations donnent finalement

$$(32) \quad d = 1 + \frac{c\rho'}{\rho + \rho'} = \frac{\frac{I'}{I} (I - i_o) + i_o - I_o}{I'} + \frac{b}{m} (t + t'),$$

par première approximation.

Voici maintenant deux des résultats de mes expériences.

ONZIÈME SÉRIE. — *Les bobines sont séparées du noyau de fer doux.*

DIMENSIONS DES DEUX BOBINES.

Hauteur.	10 centim.
Diamètre intérieur.	5 —
Diamètre extérieur.	10 —
Nombre de spires sur chaque bobine.	744
Nombre total.	1430 en deux bobines.

$$l + l' = \frac{1''}{253}.$$

$$\theta = 49^{\circ},4 \quad \rho' = 21,3 \quad \rho = 49,4.$$

$$I = 353,5$$

$$I' = 168,6 \quad d = 9,8$$

$$i_0 = 201,5 \quad c = 16,8$$

$$I_0 + 250,9$$

Si je transporte cette valeur de d dans l'expression $1 - e^{-\frac{b}{md}t}$, j'ai pour cette valeur $\frac{30,6}{31,6}$. Le terme $e^{-\frac{b}{m}t}$ n'en reste pas moins négligeable. Mes équations (28) et (29) deviennent donc :

$$I_t = I - \frac{m}{b} \frac{1}{t} \left(1 - \frac{30,6}{31,6} I' \right),$$

$$I'_t = I' - \frac{md}{b} \frac{1}{t'} \frac{30,6}{31,6} I';$$

d'où je déduis par seconde approximation :

$$d = 1 + \frac{c\rho'}{\rho + \rho'} = 10,1,$$

$$c = 17,3.$$

Une troisième approximation n'altérerait pas d'une manière sensible ces résultats.

La durée du courant dans le circuit ρ est donc devenue dix fois plus grande par le seul fait de l'enroulement du fil en spirale; elle eût été 18,3 fois plus grande si tout le circuit eût été replié de même.

DOUZIÈME SÉRIE.

Un noyau de fer doux en fer à cheval, sans armature, a été introduit dans les deux bobines précédentes :

$$\theta = 19^{\circ}4 \quad \rho' = 21,3 \quad \rho = 38,9 \quad t + t' = \frac{1}{21,5}$$

$$I = 364,1$$

$$I' = 235,5$$

$$i_0 = 217,3$$

$$I_0 = 295,7$$

$$d = 59,7$$

$$c = 166$$

Cette fois la durée de l'état variable est devenue 60 fois et eût été 166 fois plus grande, si tout le circuit eût été replié sur du fer doux.

Or, en admettant, pour la vitesse propre de l'électricité, le nombre 340 000 kilomètres par seconde, il suffit, pour expliquer les résultats obtenus par les astronomes de Greenwich, d'admettre que sur la ligne d'Édimbourg la durée de l'état variable a été rendue 28 fois plus grande, et 79 fois plus grande sur la ligne de Bruxelles.

Les résultats de la douzième série peuvent également expliquer la lenteur excessive avec laquelle s'opère la transmission des dépêches dans les câbles sous-marins armés de spirales de fer. La spirale, par sa continuité, est dans des conditions beaucoup plus favorables que le noyau de fer doux sans armature pour recevoir le travail magnétique développé par le courant et pour le lui restituer à la rupture du circuit. Ce n'est nullement là un effet de condensation électrique, comme on l'admet dans la théorie de Ohm; car cette condensation

devrait être moindre sur un fil enroulé d'une bobine à spires serrées que sur le même fil étalé dans l'espace. Cette armure de fer dont on surcharge les câbles en Angleterre offre donc le double inconvénient de rendre la pose très laborieuse et les transmissions impossibles pratiquement.

Cet accroissement dans la durée de l'état variable n'exerce, du reste, aucune influence sur l'état permanent. En effet, lorsque le courant part de zéro dans un circuit replié sur lui-même avec ou sans fer doux, on a pour l'équation différentielle du mouvement :

$$(33) \quad \frac{dv}{dt} = \frac{A}{m\rho} - \frac{b}{m} v - c \frac{dv}{dt}$$

$$(34) \quad (1+c) \frac{dv}{dt} = \frac{A}{m\rho} - \frac{b}{m} v \quad \frac{dv}{dt} = \frac{A}{m'\rho} - \frac{b}{m'} v;$$

d'où

$$(35) \quad v = \frac{A}{b\rho} \left(1 - e^{-\frac{b}{m(1+c)}t} \right),$$

$$(36) \quad i = kmv = \frac{kmA}{b\rho} \left(1 - e^{-\frac{b}{m(1+c)}t} \right).$$

$$(37) \quad I = \frac{kmA}{b\rho}.$$

Jusqu'à présent j'ai supposé le circuit ramené à l'unité normale. J'ai fait disparaître ainsi volontairement toute variation de conductibilité, de section et de masse électrique. Tout en supposant encore le circuit homogène, je vais chercher à mettre ces divers termes en évidence.

La masse électrique de l'unité de longueur d'un circuit ramené à l'unité normale peut être considérée comme constante, mais la masse de l'unité de longueur d'un circuit quelconque varie nécessairement avec la nature du conducteur. Cette variation doit être telle cependant que le

rapport $\frac{b}{m}$ reste constant dans les limites d'exactitude de l'expérience. Le moyen le plus simple de satisfaire à cette condition serait de poser $b = b'm$, d'où $\frac{b}{m} = b'$. Pour éviter toute hypothèse, je suivrai, en sens inverse, la marche adoptée pour arriver à l'équation finale de l'état variable du courant.

L'expérience m'apprend que $\frac{b}{m}$ est constant, je le représente par ϵ . L'expérience enseigne, d'autre part, que la résistance d'un circuit homogène croît comme la longueur du circuit et en raison inverse de sa section; en sorte qu'en désignant par B ce que l'on est convenu d'appeler la force électromotrice, par l la longueur du circuit, par c' la résistance de l'unité de longueur et de section du circuit, on a :

$$I = \frac{Bs}{lc'}.$$

Enfin, mes recherches sur la conductibilité des dissolutions salines, recherches qui feront l'objet du second fascicule de mes Mémoires, me conduisent à considérer c' comme une fonction de la masse électrique; de telle sorte qu'en désignant par μ la masse électrique de l'unité de longueur et de section du conducteur $c' = \frac{c}{\mu}$, c étant un paramètre variable avec la constitution moléculaire du conducteur.

L'équation de l'état variable devient donc :

$$(38) \quad I = \frac{B\mu s}{lc} \left(1 - e^{-\epsilon t} \right),$$

et en différenciant :

$$(39) \quad \frac{di}{dt} = \frac{\epsilon B\mu s}{lc} - \epsilon i.$$

D'autre part,

$$i = k\mu s v, \quad \frac{di}{dt} = k\mu s \frac{dv}{dt},$$

dans lesquelles k est un facteur constant dépendant de l'unité adoptée pour la mesure des intensités du courant i . Il vient dès lors :

$$(40) \quad \frac{dv}{dt} = \frac{B\epsilon}{kc} - \epsilon v,$$

Et comme la masse à mouvoir est $\mu s l$, la force motrice est $F = \frac{\epsilon B \mu s}{kc}$, et la force résistante $R = \epsilon \mu s l v$. ϵ étant constant, la force résistante R est proportionnelle à la quantité de mouvement $\mu s l v$, quel que soit le conducteur, au moins dans les limites où ϵ n'est apparu constant. L'expression de la force motrice est plus compliquée en apparence. Nous voyons d'abord que cette force est proportionnelle à s , ce qui indique que la pression électromotrice est proportionnelle aux surfaces sur lesquelles elle s'exerce, ce qui est le propre des fluides élastiques. $\frac{\epsilon B \mu}{kc}$ représente donc la pression sur l'unité de surface. Tous les termes contenus dans cette expression sont confondus en un seul par la manière même dont on évalue généralement la force électro-motrice d'une pile.

La résistance totale développée dans le circuit ayant pour expression $R = \epsilon \mu s l v$, le travail résistant total est : $T_r = \epsilon \mu s l v^2$. Or, d'après mes unités, ce travail est, en kilogrammètres :

$$(41) \quad T_r = \epsilon \mu s l v^2 = \frac{i^2 l}{41144000000}.$$

La puissance vive renfermée dans tout le circuit aura donc pour expression :

$$(42) \quad \frac{\mu s l v^2}{2} = \frac{i^2 l}{41144000000000}.$$

C'est à elle qu'est due l'étincelle de rupture.

Le travail résistant développé par seconde dans le circuit est 10 000 fois plus grand que la puissance vive qui y persiste, en sorte que cette puissance vive se renouvelle intégralement 10 000 fois par seconde. J'ai donc pu admettre que pendant la durée des contacts sur bois, lorsque ρ' est enlevé, tout mouvement électrique a eu largement le temps de disparaître dans le circuit ρ .

Dans tout système en équilibre le travail résistant total T_r et le travail moteur T_m doivent être égaux. La force motrice est $F = \frac{\epsilon B \mu s}{k c}$, le travail moteur sera donc $F v = \frac{\epsilon B \mu s v}{k c}$, d'où nous tirons :

$$(43) \quad \frac{\epsilon B \mu s v}{k c} = \epsilon \mu s l v^2 = \frac{i^2 l}{41144000000}.$$

Pour un courant i d'intensité égale à 1, cette équation devient :

$$(44) \quad k \mu s v = 1, \quad \frac{\epsilon B}{k^2 c} = \frac{\epsilon v}{k} = \frac{l}{41144000000}.$$

et pour une quantité de mouvement égale à 1,

$$(45) \quad \mu s v = 1, \quad \frac{\epsilon B}{k c} = \epsilon v = \frac{k l v}{41144000000}.$$

$\frac{\epsilon B}{k^2 c}$ représente le travail spécifique de la pile, quantité que l'on peut déterminer pour chaque pile, en comparant cette expression avec celle de la pression électromotrice sur chaque unité de surface :

$$\frac{\epsilon B}{k^2 c} \text{ et } \frac{\epsilon B \mu}{k c}.$$

Nous voyons que leur rapport est $\frac{\mu}{k}$. D'après la manière dont on procède généralement pour mesurer les forces

électromotrices ou le travail spécifique des piles, comme on a toujours soin d'exprimer toutes les résistances en fonction d'une résistance normale, $\frac{\mu}{k}$ reste constant; on peut donc

prendre le travail spécifique de la pile comme mesure proportionnelle de sa force électromotrice, ou réciproquement.

Il importe cependant de voir quelle est l'origine de ce rapport et quelles sont les variations qu'il subit.

On est encore loin d'être d'accord sur l'origine de la force électromotrice. L'opinion qui me paraîtrait la plus probable, c'est que la dyssymétrie des surfaces de contact forme le point de départ de cette force; qu'en vertu de cette dyssymétrie, la vibration calorifique dont chaque corps est animé deviendrait dyssymétrique elle-même, d'où naîtrait le mouvement électrique. Ce mouvement électrique s'arrêterait, rapidement épuisé par les résistances, s'il n'était entretenu par une cause extérieure, chaleur, frottement... ou intérieure, travail moléculaire résultant des actions chimiques qui se produisent dans la pile. Or cette dyssymétrie des surfaces de contact peut être fonction de la masse électrique μ et lui être proportionnelle, tandis que le travail moléculaire spécifique de la pile en serait indépendant par la manière même dont il est évalué. Il est du reste possible d'aborder directement cette question par l'expérience. L'évaluation du travail spécifique peut se faire soit, au moyen de la boussole, soit au moyen du calorimètre. L'évaluation de la pression électromotrice peut s'effectuer, soit au moyen de la méthode d'opposition de M. Regnault, débarrassée des causes d'erreur qu'elle présente, soit au moyen du condensateur par la mesure de la tension électrique qui dans un circuit ouvert fait équilibre à la pression électromotrice. Cette seconde méthode, quoique plus facile à manier peut-être que la première, est cependant sujette aux mêmes causes d'erreur.

Des diverses inconnues i , B , s , l , c , ϵ , k , μ et ν , les unes sont fournies par les données mêmes de l'expérience. C'est ainsi que pour la pile de Smée et pour mon conducteur normal je trouve :

$$l = 25500 \text{ m. pour } i = 1.$$

$$S = 0^m,000004$$

$$B = 18796$$

$$c = \frac{4}{1362000}$$

$$\epsilon = 20000$$

Pour les trois autres, k , μ et ν , je n'ai jusqu'à présent que deux équations qui laissent une indéterminée.

Les nombreuses questions que ce mémoire laisse en suspens seront examinées successivement dans mes mémoires ultérieurs. Je n'ai pas la prétention de les résoudre toutes, mais j'espère que mes longues recherches auront jeté quelque lumière sur la plupart d'entre elles.

FIN.

TABLE DU PREMIER FASCICULE.

	Pages.
PREMIER MÉMOIRE. — De la mesure des courants électriques.	1
DEUXIÈME MÉMOIRE. — De l'unité de	38
TROISIÈME MÉMOIRE. — De l'établissement des courants électriques dans les circuits bons conducteurs. — Théorie des courants électriques.	57

Pour paraître prochainement :

DEUXIÈME FASCICULE.

QUATRIÈME MÉMOIRE. — Conductibilité des corps.

CINQUIÈME MÉMOIRE. — Résistances aux changements de conducteurs.

SIXIÈME MÉMOIRE. — Des forces électromotrices des piles.

Paris. — Imprimerie de L. MARTINET, rue Mignon, 2.