Vers une vérification expérimentale de la théorie de la relativité restreinte : réplication des expériences de Charles-Eugène Guye (1907-1921)

Yacin Karim

▶ **To cite this version:**

Yacin Karim. Vers une vérification expérimentale de la théorie de la relativité restreinte : réplication des expériences de Charles-Eugène Guye (1907-1921). Autre [q-bio.OT]. Université Claude Bernard - Lyon I; Université de Genève, 2011. Français. NNT : 2011LYO10089 . tel-00839315

HAL Id: tel-00839315
https://theses.hal.science/tel-00839315

Submitted on 27 Jun 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Année 2011 $N°$ 89–2011

Thèse de l'Université de Lyon

délivrée par

l'Université Claude Bernard Lyon 1

et préparée en cotutelle avec

l'Université de Genève

École doctorale EPIC

Diplôme de doctorat

Spécialité « Histoire des Sciences et des Techniques »

(arrêté du 7 août 2006 / arrêté du 6 janvier 2005)

soutenue publiquement par

le 12 mai 2011

M. KARIM Yacin

Vers une vérification expérimentale de la théorie de la relativité restreinte

Réplication des expériences de Charles-Eugène Guye (1907-1921)

Directeurs de thèse : Pierre Crépel et Jan Lacki

COMPOSITION DU JURY

M.	Olivier Darrigol	Rapporteur	Directeur de recherches CNRS
M.	Friedrich Steinle	Rapporteur	Professeur
M.	Hugues Chabot	Examinateur	Maître de Conférences
M.	Marc Ratcliff	Examinateur	Maître d'enseignement et de recherche
M.	Pierre Crépel	Directeur de thèse	Chargé de recherches CNRS
M.	Jan Lacki	Directeur de thèse	Professeur

À ma fille.

Remerciements

Mon travail sur les expériences de Charles-Eugène Guye a pu être entrepris grâce au financement initial apporté par Monsieur Jean Michel Pictet. Il nous a quittés en janvier 2010, sans voir l'aboutissement du projet qu'il avait contribué à lancer. Je ne l'ai rencontré qu'à quelques reprises, mais il s'est toujours montré avenant, chaleureux, curieux de ce que je faisais et souriant. Je garde un souvenir ému de notre dernière rencontre, au Musée d'histoire des sciences de la ville de Genève à l'occasion de ses 80 ans.

Quelques années plus tard, je m'apprête à rendre ce travail. Messieurs Olivier Darrigol et Friedrich Steinle ont accepté d'en être les rapporteurs. Je les en remercie. Mais je voudrais également les remercier pour les discussions que nous avions eues bien avant cela.

Monsieur Darrigol, en toute simplicité, avait bien voulu, au tout début, prendre le temps de discuter avec moi du contexte dans lequel la théorie de la relativité s'est développée et a été comprise. Plus tard, il s'était montré à nouveau intéressé par mes recherches sur la reconstruction de l'expérience de Guye et Lavanchy.

Monsieur Steinle, lors de son passage par l'Université Lyon 1, s'était montré enthousiaste face au sujet de ma thèse. De même au cours d'une intervention à l'Université Carl von Ossietzky à Oldenburg (Allemagne), ses questions m'avaient ouvert tout un champ de réflexion quant à la réception des expériences de Guye.

De telles rencontres m'ont permis de croire en l'intérêt de mon travail et de ma réflexion.

C'est en mai 2003 que j'ai eu vent du projet d'étudier et de reconstruire l'expérience de Guye et Lavanchy. J'étais étudiant en DEA à l'Université Lyon 1. Pierre

Crépel et Hugues Chabot encadraient mon travail de mémoire. Plus que des "encadrants", j'avais déjà trouvé en chacun d'eux des chercheurs exigeants et des hommes compréhensifs et attentifs. Cette thèse a été l'occasion de confirmer et d'approfondir ce sentiment.

Les questions toujours pertinentes, le savoir étendu et les relectures pointilleuses de Pierre Crépel m'ont permis d'enrichir ma réflexion, sur l'histoire des sciences en général et sur celle que je raconte ici en particulier.

Hugues Chabot a quant à lui lu et relu de nombreuses fois mes essais d'écriture. Ses relectures pointues et attentives, ses questions et ses idées fécondes ont participé grandement à améliorer la qualité de mon travail, même si je n'ai pu poursuivre dans toutes les directions qu'il me suggérait.

Mais, ce sont leurs encouragements constants, leur patience inébranlable et leur soutien indéfectible, que je retiens tout particulièrement de ces années passées à travailler de près ou de loin avec Pierre Crépel et Hugues Chabot. Qu'ils soient convaincus que, sans eux, personne ne serait en train de lire ce texte.

Jan Lacki et Jean Claude Pont m'ont accordé toute leur confiance en acceptant de me confier le projet d'étudier et de réaliser une réplication des expériences de Guye. La simplicité de leur accueil jointe à l'attrait indéniable de leur proposition m'a convaincu de me joindre à eux.

Jean Claude Pont s'est toujours montré intéressé et disponible. Il a aussi su me faciliter les démarches administratives dans lesquelles je n'excelle définitivement pas.

La réplication s'est déroulée à Genève sous l'œil de Jan Lacki que j'ai ainsi côtoyé quotidiennement ou presque pendant trois ans. Il lui a certainement fallu beaucoup de patience pour faire avec ma tendance au silence. Malgré cela, il a toujours conservé un regard critique et acéré sur ce que je lui disais, sur mes hypothèses, mes réponses, me forçant ainsi à toujours mettre au point des justifications et des raisonnements aussi pertinents que possible. Je l'en remercie sincèrement.

Monsieur Marc Ratcliff a accepté d'être membre du jury lors de la soutenance. Je ne l'ai encore jamais rencontré. Je le remercie d'avoir bien voulu se plonger dans mon travail, participant ainsi à son aboutissement.

Reconstruire une expérience telle que celle de Guye et Lavanchy n'aurait tout

simplement pas été possible sans une aide méthodologique et matérielle, et sans les savoir-faire techniques de nombreuses personnes.

Peter Heering m'a apporté un support franc et d'une richesse indéniable. Lui et Christian Sichau m'ont invité au *Deutsches Museum* à Münich, me permettant de visiter longuement et librement ce lieu d'une incroyable richesse.

Peter Heering a aussi accepté de m'accueillir au sein de l'équipe de Falk Riess à Oldenburg, m'accordant à chacune de mes trois visites le temps pour discuter de mon projet, de mes difficultés, de la meilleure façon de les traiter et de les interpréter. Il a su partager avec moi sa très grande expérience pratique de la réplication. Son aide et son soutien m'ont aidé à ne pas baisser les bras devant les difficultés que je voyais chaque jour plus grandes.

Certaines pièces historiques de première importance sont conservées au Musée d'histoire des sciences de la ville de Genève. Parmi elles se trouvent deux exemplaires des tubes cathodiques utilisés par Guye. L'équipe du Musée m'a autorisé à les observer de près à de nombreuses reprises. C'était à chaque fois un plaisir ; je savais que l'accueil serait comme toujours sympathique et chaleureux. Je tiens à remercier tout particulièrement Stéphane Fisher et Gilles Hernot qui m'ont ouvert toutes (ou presque) les portes du lieu, de la bibliothèque au *compactus*. C'est d'ailleurs ainsi que j'ai pu redécouvrir une partie des clichés originaux réalisés lors de l'expérience de Guye et Lavanchy.

Seul face au tube original, la tâche m'aurait été impossible. La Section de physique de l'Université de Genève avait cependant la chance de compter parmi ses membres deux techniciens aussi compétents que généreux, Rémy Richard, mécanicien chef de l'Atelier des assistants et André Schweizer, souffleur de verre. Ils se sont impliqués dans le projet de reconstruction du tube cathodique comme je n'aurais osé l'espérer, apportant ainsi tout leur savoir, tout leur savoir-faire et tout leur entrain. Ils ont pris en charge la reconstruction, mon rôle revenant alors à confirmer ou préciser certains détails grâce aux articles originaux. Merci à vous deux.

Je n'ai pu reconstruire entièrement l'expérience complexe de Guye et Lavanchy. Une partie des instruments "modernes" que j'ai utilisés ont été mis à ma disposition par Charly Bürgisser. À chaque nouvelle demande, il me donnait les détails techniques nécessaires à leur prise en main rapide et informée. Il m'a ouvert la porte de la "caverne" de la Section de physique, pièce dans laquelle ont été accumulés de

nombreux instruments et machines un jour utilisés par les physiciens genevois. Je ne pourrai pas le remercier de vive voix. Il ne pourra apporter sa bonne humeur lors de la soutenance.

La pompe à vide et le générateur haute-tension m'ont été prêtés par le CERN. Je remercie Messieurs Dimitri Delikaris, Robert Chanut et Richard Scrivens pour ces prêts et toute l'attention qu'ils ont bien voulue porter à ce projet, en m'apprenant à utiliser ces appareils.

La réplication m'a donné également donné l'occasion de rencontrer Werner Kloeti, dont les savoirs techniques impressionnants m'ont été particulièrement utiles alors que j'essayais de réaliser un écran fluorescent correct. Ce sont ses idées que j'ai exploitées, je l'espère correctement.

Je remercie enfin les bibliothécaires de la Section de physique grâce à qui j'ai pu avoir accès à de nombreux documents, toujours de manière rapide, même quand j'étais à Lyon. Elles m'ont prêté avec confiance et pendant des heures les clés des armoires contenant les ouvrages les plus anciens dont j'avais besoin. Leur aide me fut précieuse.

D'un point de vue plus personnel, je tiens à remercier sincèrement ceux qui étaient là avant et qui le resteront, j'espère, encore longtemps.

Mes parents tout d'abord. Mon père, pour m'avoir appris à interroger le monde dans lequel je vis jusque dans ses évidences. Ma mère, pour la confiance que j'ai toujours lue dans le regard qu'elle porte sur moi.

Mon frère et mes sœurs, ensuite, pour avoir toujours respecté mon travail sans attendre en retour un merci de ma part. Ils l'ont aujourd'hui.

Il y a presque huit ans aujourd'hui, je te demandais ton avis sur ce projet de thèse que l'on me proposait. Tu m'as dit "vas-y, on s'arrangera". J'y suis allé, on s'est arrangés.

Tu ne m'as pas seulement soutenu dans les moments difficiles. Tu m'as écouté longuement formuler et reformuler mes réflexions. Tu as questionné mes idées. Tu m'as critiqué. Tu m'as énervé. Bref, tu m'as permis d'enrichir ma pensée. Comment te remercier pour cela, si ce n'est en te demandant de continuer ...

Résumé

Nous nous intéressons dans cette thèse à un aspect assez peu documenté de l'histoire de la théorie de la relativité restreinte, la recherche d'une vérification expérimentale de ses prédictions sur la variation de l'inertie en fonction de leur vitesse. Nous complétons les études historiques antérieures sur les expériences de Kaufmann (1906) et de Bucherer (1908), et montrons que la vérification de la formule de Lorentz-Einstein constitue encore un enjeu expérimental après 1911. Nous étudions plus particulièrement les recherches dirigées par Charles-Eugène Guye en collaboration avec ses étudiants Simon Ratnowsky (1907-1910) et Charles Lavanchy (1913-1915). Nous montrons que la seconde phase de ce travail est très largement considérée dans les années 1920 comme la vérification expérimentale la plus précise de la formule de Lorentz-Einstein. Nous utilisons la méthode de réplication, appliquée à l'expérience de Guye et Lavanchy. La très grande maîtrise de l'émission cathodique, associée à une méthode d'investigation spécifique, leur permet de surmonter toutes les difficultés identifiées alors comme préjudiciables au succès de ce type d'expérience.

Mots clés : expérience de Guye et Lavanchy ; théories de l'électron ; théorie de la relativité restreinte ; formule de Lorentz-Einstein ; formule d'Abraham ; Charles-Eugène Guye ; méthode de réplication ; rayons cathodiques ; émission cathodique.

Abstract

We focus on an aspect of the history of special relativity theory that has not received much attention yet, namely the search for an experimental verification of the relativistic velocity dependency of inertia. Former historical studies on Kaufmann's 1906 and Bucherer's 1908 experiments are pursued. It is shown that verifying Lorentz-Einstein's formula is still a challenge after 1911. We concentrate here on Charles-Eugène Guye's works with students Simon Ratnowsky (1907-1910) and Charles Lavanchy (1913-1915). The second experiment is shown to be considered as the most precise verification of Lorentz-Einstein's formula by a large number of 1920s physicists. The replication method is used to probe Guye and Lavanchy's experiment. They are able to solve every then known difficulty in successfully performing such an experiment, through a great mastership of the crucial issue of cathode ray emission, together with a specific investigation method.

Keywords : Guye and Lavanchy's experiment ; electron theories ; special relativity theory ; Lorentz-Einstein's formula ; Abraham's formula ; Charles-Eugène Guye ; replication method ; cathode rays ; cathode ray emission.

Table des matières

Introduction **1**

1 Variation de l'inertie avec la vitesse **11**

Introduction 14

1.1 L'inertie électromagnétique : d'une possibilité théorique à un objectif programmatique 16

1.1.1 Prémisses d'une conception électromagnétique de l'inertie . . 16

1.1.2 Un nouveau programme de recherche : la conception électromagnétique globale de la physique 17

1.2 Première description électromagnétique de l'électron : la théorie d'Abraham 21

1.2.1 Premières expériences de Kaufmann 21

1.2.2 Abraham répond aux conclusions de Kaufmann 22

1.2.3 La théorie de l'électron sphérique indéformable d'Abraham (1902-1903) 23

1.3 La théorie électromagnétique de Lorentz et le modèle de l'électron déformable 31

1.3.1 La théorie électromagnétique de Lorentz avant 1899 31

1.3.2 La théorie de Lorentz en 1899 35

1.3.3 Le modèle de l'électron de Lorentz (1904) 38

1.4 L'électron déformable de Lorentz *versus* l'électron indéformable d'Abraham 43

1.4.1 Un problème de stabilité pour l'électron de Lorentz 43

1.4.2 Incompatibilité entre conception électromagnétique globale et impossibilité de détecter le mouvement absolu de la Terre . . 46
1.5 La théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein. Une conception différente de l'inertie ? 49
1.5.1 La masse transverse de l'électron dans la théorie d'Einstein : de la formule d'Einstein à la formule de Lorentz-Einstein . . 49
1.5.2 Théorie de Lorentz, théorie d'Einstein ou théorie de Lorentz-Einstein ? 53
1.6 Mesurer la variation de l'inertie de l'électron avec sa vitesse : une épopée qui n'aboutit pas ? 57
1.6.1 Pourquoi la question de l'inertie de l'électron est-elle si importante dans les années 1900-1910 ? 57
1.6.1.1 Les successeurs de Kaufmann 57
1.6.1.2 La variation de l'inertie de l'électron avec la vitesse : une question au cœur de plusieurs problématiques théoriques 58
1.6.2 Expériences sur la variation de l'inertie des électrons entre 1906 et 1916 60
1.6.2.1 L'expérience de Kaufmann (1906) et ses réceptions . 60
1.6.2.2 Âpreté des débats autour des expériences sur la variation de l'inertie de l'électron avec la vitesse : les échanges Bucherer-Bestelmeyer (1908-1910) et Hupka-Heil (1909-1910) 65
1.6.2.3 Conclusion (provisoire) : les expériences de Schaefer et Neumann (1911-1914) et Guye et Lavanchy (1913-1916) 71
1.6.3 Analyse critique (mais non historique) des conclusions obtenues dans les années 1910 73
1.6.4 Pour une relecture historique des expériences des années 1910 77
1.6.4.1 Le point de vue des historiens 77
1.6.4.2 Réception des expériences de Neumann et de Guye et Lavanchy autour de 1920 78

1.6.4.3 Pistes pour une analyse historique de l'expérience de Guye et Lavanchy 83
Conclusion 85

2 Charles-Eugène Guye (1866-1942). 89

Introduction 91
2.1 Le début de carrière de Guye 95
2.1.1 Premiers travaux à Genève (1887-1891) puis à Zürich (1891-1900) 95
2.1.2 Le retour improbable de Guye à Genève 97
2.1.2.1 La démission de Soret 97
2.1.2.2 L'affaire Pierre Curie 98
2.1.2.3 L'appel à Guye 101
2.1.3 Les débuts difficiles de Guye (1900-1903) 104
2.2 L'activité scientifique au laboratoire de Guye 109
2.2.1 Développement du laboratoire 109
2.2.2 Vue d'ensemble de l'œuvre scientifique de Guye 109
2.2.3 Guye, directeur de recherche au Laboratoire de physique . . . 112
2.3 Comment situer les expériences sur l'inertie des électrons parmi les travaux scientifiques de Guye ? 119
2.3.1 Guye et la question de l'inertie de l'électron 120
2.3.1.1 Conférences sur la "constitution électrique de la matière" en 1904 120
2.3.1.2 La charge spécifique l'électron — 1906 124
2.3.1.3 Guye et l'inertie entre mai 1906 et 1907 129
2.3.1.4 Étudier l'inertie des électrons au laboratoire de Guye en 1907 131
2.3.2 Retombées des recherches sur l'inertie des électrons pour Guye et son laboratoire 136
2.3.2.1 La place de Guye en Suisse 136
2.3.2.2 Doctorat *honoris causa* de la faculté des sciences de Paris — 1926 137

2.3.2.3 Guye, Correspondant pour la section de physique générale à l'Académie des sciences de Paris 138
2.3.2.4 Autres institutions hors de la Suisse 139
Conclusion 141

3 Les expériences de Guye sur la variation de l'inertie avec la vitesse (1906-1921) 143

Introduction 145
3.1 Publications et évolution des positions de Guye sur la théorie de la relativité 148
3.1.1 L'expérience de Guye et Ratnowsky — 1907-1910 148
3.1.2 L'expérience de Guye et Lavanchy — 1913-1915 150
3.1.3 Le mémoire de 1921 153
3.1.4 Guye et la relativité 163
3.2 La méthode des trajectoires identiques 168
3.2.1 Principe général des expériences 168
3.2.2 La méthode des trajectoires identiques selon Guye et Ratnowsky 169
3.2.3 Trajectoires identiques dans un champ magnétique (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 296-297) 171
3.2.4 Trajectoires identiques dans un champ électrique (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 297-298) 172
3.2.5 Principe de la méthode (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 298-299). 173
3.2.6 Détermination de la vitesse absolue des corpuscules (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 299-300) 177
3.2.7 Comparaison avec les formules théoriques (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 300-301 et p. 315) 179
3.3 Nouvel examen de la méthode des trajectoires identiques par Guye et Lavanchy : la méthode des trajectoires presque identiques 181
3.3.1 Modifications apportées au dispositif par Guye et Lavanchy . 181
3.3.2 Nouvelle analyse 182

3.3.3 Vitesse des rayons de comparaison et détermination de l'intégrale de champ électrique . . . 184
3.3.4 Les résultats de Guye et Lavanchy . . . 186
3.3.4.1 Présentation des résultats . . . 186
3.3.4.2 Une présentation problématique . . . 189
3.3.4.3 Traitement des grandeurs mesurées . . . 189
3.3.5 Guye, Ratnowsky, Einstein et la méthode des trajectoires identiques . . . 193
Conclusion . . . 196

4 Réplication de l'expérience de Guye et Lavanchy 199
Introduction . . . 202
4.1 Reconstruction du tube cathodique : première étape de la réplication 204
4.1.1 Objectifs . . . 204
4.1.2 Utilisation d'une source textuelle : la description du tube faite par Guye et Lavanchy . . . 206
4.1.2.1 Description originale . . . 206
4.1.2.2 Analyse de la description originale . . . 207
4.1.3 Observations du tube cathodique original . . . 209
4.1.3.1 Conditions de l'observation . . . 209
4.1.3.2 L'enceinte de verre . . . 210
4.1.3.3 Les électrodes . . . 214
4.1.3.4 Le dispositif de déviation électrique . . . 216
4.1.4 Construction d'une copie du tube cathodique original . . . 218
4.1.4.1 Ecarts liés à des contraintes techniques . . . 221
4.1.4.2 Autres solutions apportées . . . 223
4.2 Premières expérimentations ; mise en évidence d'une problématique expérimentale spécifique : la technique de production des rayons cathodiques . . . 226
4.2.1 Objectifs . . . 226
4.2.2 Réaliser l'émission cathodique avec la copie du tube de Guye et Lavanchy . . . 227

4.2.2.1 Mise au point d'un *dispositif minimal* et premières tentatives d'utilisation du tube 227
4.2.2.2 De l'observation de *phénomènes électriques dans l'air* à la production et à l'observation du rayonnement cathodique 229
4.2.2.3 Analyse 236
4.2.2.4 Améliorations du dispositif et retour sur la stabilité de l'émission 238
4.2.3 Transposer la technique expérimentale originale de production des rayons cathodiques à notre dispositif 244
4.2.3.1 Régler le dispositif selon Guye et Lavanchy 244
4.2.3.2 Contrôler l'émission avec notre dispositif 247
4.3 Prise de mesures 254
4.3.1 Objectifs 254
4.3.2 Déviations électrique et magnétique des rayons cathodiques . 255
4.3.2.1 Les bobines magnétiques 255
4.3.2.2 Les alimentations des bobines et du condensateur . 256
4.3.2.3 Les interrupteurs et commutateurs 258
4.3.3 Les mesures dans le dispositif de Guye et Lavanchy 259
4.3.3.1 Organisation chronologique de la réplication, contraintes de temps et contraintes matérielles. 259
4.3.3.2 Mesure de l'intensité et de la tension de déviation . 261
4.3.3.3 Dispositif de visualisation et d'enregistrement des déviations 263
4.3.4 Le dispositif reconstruit : synthèse 272
4.3.4.1 Quelques photos 273
4.3.4.2 Comparaison entre le dispositif original et sa copie . 273
4.3.5 Reconstruction de l'activité de mesure 276
4.3.5.1 Rappels : le protocole expérimental décrit par Guye et Lavanchy 277
4.3.5.2 Première tentative de mesures : mise en évidence de certaines difficultés 283

4.3.5.3 Deuxième série de mesures : réalisation de mesures systématiques 290
Conclusion 297

5 L'émission cathodique 301

Introduction 303
5.1 L'émission cathodique dans l'historiographie 304
5.2 Importance des mécanismes d'émission dans les classifications des rayonnements électriques 318
5.2.1 *Ions, Electrons, Corpuscules* en 1905 319
5.2.2 Townsend et les phénomènes électriques dans les gaz (1915) . 320
5.2.3 Les mesures de la charge spécifique présentées par Gerlach (1926) 321
5.2.4 Une classification des décharges électriques dans les gaz . . . 322
5.2.5 Les "Rayons Cathodiques" vus par Lenard et Becker 323
5.2.6 Retour à la présentation de Gerlach 325
5.3 Mécanismes d'émission et mesure des propriétés électrique et inertielle des rayons cathodiques 327
5.3.1 Choix et présentation du corpus étudié 327
5.3.2 Mesurer de la charge spécifique : étudier la composition des rayonnements électriques 327
5.3.3 Recherche de précision dans la mesure de la charge spécifique 331
5.3.4 Etude de la variation de l'inertie des électrons artificiellement accélérés : débat autour des techniques de production 337
Conclusion 341

Conclusion 343

Bibliographie 353

A Annexe A : Classement thématique et chronologique des publications de Guye 375

A.1 Polarisation rotatoire : 1889-1893 375
A.2 Courants alternatifs, Induction, Capacité des lignes : 1893-1901 . . . 376

A.3 Recherches sur l'arc voltaïque : 1902-1908 378
A.4 Etude du magnétisme : 1902-1914 379
A.5 Élasticité des solides et frottement intérieur : 1903-1929 381
A.6 Appareils et dispositifs de mesures 384
A.7 Variation de l'inertie de l'électron avec la vitesse et Relativité : 1906-1921 385
A.8 Potentiel explosif dans les gaz à pression élevée : 1905, puis 1916-1926 386
A.9 Rotation électromagnétique de la décharge et diamètres moléculaires : 1917-1927 388
A.10 Physico-chimie et Biologie 389
A.11 Sujets divers 390

B Annexe B : Reproduction de documents originaux d'une importance particulière 395
B.1 L'affaire Pierre Curie 395
B.2 L'appel à Guye 412
B.3 Guye et son laboratoire : demandes de financement 417
B.4 Lettres écrites par Einstein à Guye 420
B.5 Lettre de Starke à Guye, le 29 décembre 1922 424

C Annexe C : Clichés originaux retrouvés au Musée d'histoire des sciences 425

D Annexe D : Réalisation d'un programme de calcul de l'intégrale de champ électrique dans le tube reconstruit 433

Table des figures

1 Congrès de Solvay 1927 5

2.1 Les membres du laboratoire en 1912 110
2.2 Vue d'ensemble de l'œuvre scientifique de Guye 111

3.1 Le mémoire de 1921 154
3.2 Photographie du dispositif expérimental 161
3.3 Photographie de la table d'expérience 161
3.4 Deux clichés proposés par Guye 162
3.5 Schema du tube cathodique 168
3.6 Schema général 169
3.7 Résultats des expériences de Guye et Ratnowsky 180
3.8 Résultats (lissés) des expériences de Guye et Lavanchy 187
3.9 Résultats des expériences de Guye et Lavanchy (formule de Lorentz-Einstein) 188
3.10 Résultats des expériences de Guye et Lavanchy (formule d'Abraham) 188

4.1 Coffret contenant deux exemplaires des tubes utilisés par Guye, Ratnowsky et Lavanchy 205
4.2 Photographie du tube cathodique donnée par Guye et Lavanchy . . 205
4.3 Tube cathodique de Guye et Lavanchy 210
4.4 Tube cathodique : dispositif de déviation électrique — traversée . . . 211
4.5 Tube cathodique : dispositif de déviation électrique — traversée vue de l'intérieur 212
4.6 Tube cathodique : traversée verre-métal au niveau de la cathode . . 213

4.7 Tube cathodique : compartiment de verre soudé au tube cathodique 213
4.8 Tube cathodique : la cathode 214
4.9 Tube cathodique : soudure entre l'anode et le dispositif de déviation électrique 215
4.10 Tube cathodique : le diaphragme 216
4.11 Tube cathodique : détails de l'anode 217
4.12 Tube cathodique : Vis de réglage de la hauteur des plateaux du condensateur 218
4.13 Tube cathodique : Vis de réglage de la hauteur des plateaux du condensateur 219
4.14 Tube cathodique : Montage du cylindre *D*. 220
4.15 Tube cathodique : connexion entre l'anode et l'extérieur. 224
4.16 Le dispositif expérimental de Guye et Lavanchy. 240
4.17 Schéma de la table d'expérience de Guye et Ratnowsky. 240
4.18 Les bobines magnétiques 257
4.19 Interrupteur-commutateur original 259
4.20 Le dispositif d'interrupteurs-commutateurs 260
4.21 Schéma des modifications apportées à l'appareil photographique par Guye et Lavanchy. 267
4.22 L'appareil photographique original (1). 268
4.23 L'appareil photographique original (2). 269
4.24 Le dispositif reconstruit(1). 273
4.25 Le dispositif reconstruit(2). 274
4.26 Le dispositif reconstruit(3). 274
4.27 Double déviation électrique servant à la détermination de l'intégrale de champ électrique (1). 286
4.28 Double déviation électrique servant à la détermination de l'intégrale de champ électrique (2). 287
4.29 Une première détermination enregistrée pour les rayons de comparaison. 287
4.30 Une seconde détermination enregistrée pour les rayons de comparaison. 288
4.31 Premiers résultats de mesure. 289

4.32 Résultats comparés à la formule de Lorentz-Einstein. 294
4.33 Résultats comparés à la formule d'Abraham. 295
4.34 cliché d'une double-déviation électrique ayant servi à la mesure de A. 296
4.35 Cliché d'une détermination effectuée sur les rayons de comparaison. . 296
4.36 Cliché d'une détermination effectuée sur des rayons de vitesse $\beta =$ 0,3785. 297

C.1 Etude des variations de l'intégrale de champ 426
C.2 Mesure de l'intégrale de champ électrique (1) 426
C.3 Mesure de l'intégrale de champ électrique (2) 427
C.4 Mesure des grandeurs de comparaison (1) 428
C.5 Mesure des grandeurs de comparaison (2) 428
C.6 Mesure des grandeurs de comparaison (3) 429
C.7 Cliché des déterminations (1) 430
C.8 Cliché des déterminations (2) 430
C.9 Cliché des déterminations (3) 431
C.10 Cliché des déterminations (4) 431
C.11 Cliché des déterminations (5) 432

Liste des tableaux

4.1 Tableau comparatif différents éléments du dispositif original et du dispositif reconstruit. 276

4.2 Mesures de l'intégrale de champ électrique et de la vitesse de comparaison. 292

5.1 Etudes expérimentales sur les faisceaux d'électrons artificiellement accélérés entre 1901 et 1916 328

Introduction

> "*Avant d'en venir à la critique de la mécanique considérée comme fondement de la physique, il me faut d'abord formuler quelques remarques d'ordre général concernant les différents points de vue selon lesquels les théories physiques peuvent être critiquées. Le premier point de vue va de soi ; la théorie ne doit pas contredire les faits empiriques. Pour évidente que cette exigence puisse paraître de prime abord, son application n'en n'est pas fort moins subtile.*" [1]

Lorsqu'il écrit ce texte en 1949, Albert Einstein envisage l'accord "subtil" entre théorie et expérience surtout du point de vue de la théorie. Il poursuit en effet en avançant l'argument qu'il est souvent possible de faire appel à de nouvelles hypothèses afin de réconcilier théorie et expérience. Nous envisageons dans cette thèse un point de vue différent, mais certainement complémentaire, celui de l'expérience. En particulier, nous interrogeons les critères sur lesquels une expérience peut être validée ou refusée, et comment sa réception peut être modifiée au cours du temps. Nous tenons à préciser en premier lieu que ces questions se sont posées au cours de l'étude historique d'une série d'expériences menées à Genève entre 1907 et 1915. Conscients des implications philosophiques de telles questions, nous avons néanmoins choisi, dans cette thèse, de nous en tenir à l'aspect historique déjà riche et complexe.

1. Balibar (2002, p. 165). Cette citation, traduite de l'anglais par Françoise Balibar, a été écrite en 1949 par Albert Einstein.

La théorie de la relativité restreinte a été le sujet de nombreuses études historiques et philosophiques. Son élaboration, sa formalisation et finalement l'acquisition du statut de pierre angulaire de la physique moderne ont été interrogées sous différents points de vue. En particulier, la question du rôle joué par les expériences dans son acceptation a soulevé de nombreux débats, tant scientifiques qu'historiques ou épistémologiques. Il semble toutefois exister un consensus au sujet du rôle joué par ces premières confrontations entre les résultats expérimentaux obtenus et publiés entre 1906 et 1915 et la théorie d'Einstein. L'historien Stephen G. Brush résume ainsi la situation :

> "[...] le fait que les théories d'Einstein et de Lorentz étaient toutes deux considérées comme faisant la même prédiction sur l'augmentation de la masse de l'électron avec sa vitesse peut expliquer pourquoi le test de cette prédiction n'a eu que peu d'effet sur l'acceptation de la théorie de la relativité restreinte." [2]

Les premiers tests évoqués par Brush étaient réalisés en étudiant la trajectoire d'électrons de grande vitesse soumis à des champs électriques et/ou magnétiques. Il s'agissait donc d'expériences de dynamique électronique. Initialement mis en œuvre dans le cadre de l'étude des rayons cathodiques à la fin du XIX^{e} siècle, les dispositifs expérimentaux furent adaptés à l'étude de la variation de la masse avec la vitesse dès 1901 en Allemagne par Walter Kaufmann. L'objectif n'était alors évidemment pas de tester les prédictions d'Einstein mais s'inscrivait dans la recherche d'un fondement électromagnétique de la description de la nature par la physique. Cet objectif, érigé en programme de recherche par Wilhelm Wien en 1900, était porté sur le plan théorique par Max Abraham, collègue de Kaufmann à Göttingen. Leur collaboration aboutit à la confirmation partielle des premières conclusions expérimentales : la masse de l'électron augmentait avec sa vitesse. Mais, en 1904, l'un des plus éminents physiciens de l'époque, Hendrik Antoon Lorentz prévit une variation de la masse différente de celle formulée par Abraham. Kaufmann reprit alors le dispositif expérimental afin de départager les deux théories. Quand il publia ses conclusions au début de l'année 1906, il assimila la théorie de Lorentz avec celle proposée quelques mois plus tôt par Einstein. Pour Kaufmann, l'"hypothèse de Lorentz-Einstein" [3] était réfutée par ses observations.

2. Brush (1999, p. 188) : " However, that both Einstein's and Lorentz's theories were considered to make the same prediction about the increase of electron mass with velocity may explain why the test of that prediction had little effect on the acceptance of the special theory of relativity." Sauf mention contraire, toutes les traductions sont originales.

3. Kaufmann (1906, p. 495).

Les conclusions de Kaufmann eurent un impact immédiat et déclenchèrent des débats passionnés au sein de la communauté des physiciens. En premier lieu, il venait de prouver que la masse de l'électron dépendait de sa vitesse. Mais d'autre part, le désaccord entre ses mesures et la formule de Lorentz-Einstein revenait à rejeter la validité du principe de relativité du mouvement ; l'accord avec la formule d'Abraham revenait quant à lui à valider l'hypothèse électromagnétique comme fondement de la physique. Peu à peu, des critiques émergèrent qui jetèrent le doute sur leur validité. De nouvelles expériences furent demandées, en particulier par Max Planck. Dès 1908, Alfred Bucherer conclut à la validité de la "théorie de Lorentz-Einstein". Accueillies favorablement par les partisans de la théorie de la relativité, le travail de Bucherer fut sévèrement critiqué par d'autres expérimentateurs. L'année suivante, un autre Allemand, Erich Hupka conclut également à la validité de la théorie de la relativité. À nouveau, cette expérience fut soumise à des critiques telles que ses conclusions apparurent comme douteuses.

Le très bref résumé qui précède rend compte de ce que nous apprend l'historiographie au sujet des premiers tests de la théorie de la relativité restreinte [4] entre 1906 et 1909. Mais si les expériences de Kaufmann ont reçu une attention toute particulière de la part des historiens, celles de Hupka et, dans une moindre mesure, de Bucherer sont le plus souvent passées sous silence. L'ouvrage de référence écrit en 1981 par Arthur I. Miller [5] constitue à ce jour l'étude la plus poussée de ces expériences avec une description détaillée des travaux de Kaufmann et de Bucherer. Mais il n'est pas fait mention du travail de Hupka [6]. En fait, pour Miller et ses successeurs, les expériences dont les résultats sont annoncés dans les années 1910 ne constituent que "la suite" [7] de l'histoire. Mais cette "suite" n'est qu'évoquée, elle n'est pas étudiée.

> "Utilisant un dispositif similaire à celui de Bucherer, Neumann (1914) fut considéré par la plupart des physiciens comme ayant ôté tout doute raisonnable au sujet de la validité de la prédiction de Lorentz-Einstein sur m_T [8]. [Lorentz (1910-1912) écrivit que les résultats de Guye et Lavanchy (1916) constituaient "un "bon supplément" à ceux de Neumann [...]" [9]

4. Miller (1981) ; Brush (1999).
5. Miller (1981).
6. Lewis Pyenson mentionne Hupka dans l'étude qu'il fait du travail de Planck, éditeur de *Annalen der Physik* et superviseur officieux des recherches de Hupka.
7. Miller (1981, p. 330) : "§12.4.5 Aftermath".
8. La masse de l'électron.
9. Miller (1981, p. 330) : "Using apparatus similar to Bucherer's, Neumann (1914) was considered by most physicists to have removed any reasonable doubts concerning the validity of Lorentz-Einstein prediction for m_T. [Lorentz (1910-1912) wrote that a "good supplement" to Neumann's

Comment se fait-il que des expériences directement liées à l'une des théories physiques les plus importantes du début du XX^{e} siècle demeurent encore largement ignorées ? L'hypothèse formulée par Brush sur leur impuissance à distinguer les théories de Lorentz et Einstein, et finalement leur rôle tout à fait mineur sur l'acceptation de la théorie de la relativité, permet certainement de comprendre le peu d'intérêt qu'elles ont reçu jusqu'alors.

Nous souscrivons à l'affirmation selon laquelle ces expériences n'ont pas été *décisives*. Cependant, certaines pièces historiques encore ignorées — bien que certaines soient à la disposition des historiens depuis la publication de la correspondance d'Einstein — laissent penser que ces travaux pourraient trouver toute leur place dans l'histoire de la théorie de la relativité restreinte. Ici, nous faisons référence à la correspondance entre Einstein et le physicien genevois, professeur ordinaire et directeur du laboratoire de physique de l'Université de Genève de 1900 à 1930, Charles-Eugène Guye (1866-1942). À plusieurs reprises, comme dans la lettre du 12 janvier 1920 citée ci-dessous, Einstein félicite Guye pour ses travaux sur la variation de la masse des électrons avec la vitesse dont les résultats définitifs, favorables à la formule de Lorentz-Einstein, sont communiqués le 12 juillet 1915 à l'Académie des sciences de Paris.

> "Vos recherches sur le mouvement des électrons font à mon avis partie des plus importantes confirmations de la théorie de la relativité restreinte." [10]

Ainsi, si les expériences qui font suite à celles de Kaufmann, Bucherer et Hupka n'ont pas été à proprement parler "décisives", celles réalisées à Genève sous la direction de Guye ne sont pas pour autant passées inaperçues. Un second élément en faveur de cette affirmation est illustré par la photographie suivante [fig. 1].

Parmi les 29 participants au cinquième congrès Solvay en 1927, Guye se trouve à la gauche de Paul Langevin, lui même assis à côté d'Einstein au premier rang. Il sera membre du conseil scientifique du comité Solvay entre 1925 et 1934. Les documents conservés au Musée d'histoire des sciences de la ville de Genève ainsi qu'aux archives de l'Académie des sciences de Paris, dont Guye fut Correspondant pour la section de physique à partir de 1927, attestent de l'importance décisive qu'ont eue les recherches de Guye au sujet de la formule de Lorentz-Einstein sur sa

results were those of Guye and Lavanchy (1916) [. . .]]".

10. Lettre conservée au Musée d'Histoire des Sciences de la ville de Genève, sous la référence Z281/1 n^{o}7 et publiée dans Einstein (2004, Lettre 255) : "Ihre Untersuchugen [sic] über die Elektronenbewegung gehört [sic] nach meiner Ansicht zu den wichtigsten Bestätigungen der speziellen Relativitätstheorie."

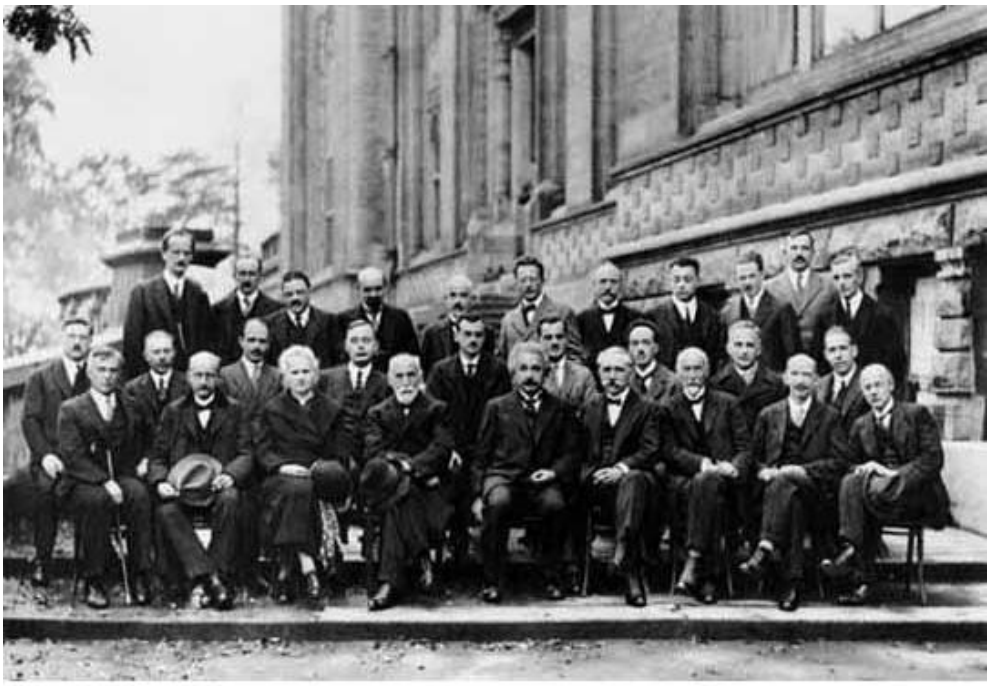

FIGURE 1 – Les participants au 5^e congrès Solvay en 1927. Guye se situe au premier rang en troisième position en partant de la droite.

reconnaissance parmi les physiciens européens des années 1920. Et si ce travail lui a offert de nombreux honneurs académiques et scientifiques, l'étude des ouvrages de promotion et de diffusion de la théorie de la relativité montre que les expériences de Guye ont figuré jusqu'aux années 1950 parmi les "vérifications" les plus précises de la formule de Lorentz-Einstein sur la variation de l'inertie avec la vitesse.

Impact scientifique mineur des résultats d'un côté, source de nombreux honneurs et argument expérimental maintes fois repris dans les manuels ou les exposés pédagogiques de l'autre, l'évaluation historique des recherches de Guye pose question. L'historiographie aurait-elle oublié ou passé sous silence une période durant laquelle montrer la validité expérimentale de la relativité restreinte constituait un réel enjeu ? Le statut d'argument expérimental des conclusions de Guye doit-il plutôt être envisagé comme "faire-valoir" au service de la pensée selon laquelle une théorie doit s'accorder avec les faits ? Mais alors, comment interpréter le statut de Guye au sein de la communauté scientifique européenne des années 1920 ?

Les recherches que nous présentons dans la première partie de cette thèse se fondent en premier lieu sur l'étude de travaux historiques qui conduisent à envisager la théorie de la relativité restreinte comme ne posant effectivement plus vraiment de problème, au sein d'une communauté de spécialistes et à partir des années 1910. Ces travaux historiques permettent également de comprendre le contexte dans lequel les recherches de Guye et de ses collègues allemands sont initialement entreprises : un enjeu épistémologique fort entre principe de relativité d'une part et réductionnisme électromagnétique de l'autre.

La première phase du travail expérimental de Guye s'étend de 1907 à 1910. Il conclut au rejet de la formule d'Abraham sans toutefois pouvoir affirmer avec force la validité de la formule de Lorentz-Einstein. Guye entreprend alors une seconde phase de recherche, à partir de 1913, expressément destinée à vérifier expérimentalement cette formule [11]. Pour quelles raisons, si la théorie d'Einstein est acceptée dès 1911 ? Nous avons cherché la réponse à cette question en reprenant des documents historiques, articles, livres, correspondances qui pour la plupart n'avaient pas encore fait l'objet d'études historiques. Ainsi, nous mettons à jour l'existence d'un enjeu reconnu, d'ordre expérimental, à poursuivre ces recherches de dynamique électronique sur la variation de l'inertie avec la vitesse. De ce point de vue, la question n'est en effet pas close. Elle constitue même un véritable défi. Il ressort de cette étude que

11. Ce sera l'expérience dite de Guye et Lavanchy, du nom de l'étudiant en charge de l'expérience dans le cadre de sa thèse de doctorat.

les expériences de Guye sont jugées favorablement à l'aune de ce défi dont les enjeux avaient été exposés dès les premiers travaux de Kaufmann : Guye a réussi là où les autres ont échoué.

Dès lors, nous cherchons à savoir comment un physicien des années 1920 peut envisager les conclusions expérimentales de Guye. En d'autres termes, nous posons la question de la réception des résultats expérimentaux.

La seconde partie de la thèse repose sur une étude originale de la carrière scientifique de Guye, dont la fonction de professeur ordinaire et directeur du laboratoire de physique de l'Université de Genève entre 1900 et 1930 constitue la partie centrale. Il réalise une transformation profonde de la recherche en physique à Genève, créant pratiquement de toutes pièces un laboratoire spécialisé en électricité en lieu et place d'un laboratoire d'optique. De plus, ses recherches sur l'inertie des électrons apparaissent comme résultant d'une volonté manifeste d'aborder ce sujet précis, avec de réels efforts financiers pour l'achat de matériel nouveau et à la pointe de la technologie, ainsi que le développement de nouveaux savoir-faire en complément de ceux que Guye possède déjà suite à son passage à Zürich dans les années 1890. Ces efforts ne seront pas vains. Guye en recueille les fruits dès la fin des années 1910 et durant les années 1920 : il fait alors figure d'éminent expérimentateur spécialiste des phénomènes électriques dans les gaz et des mesures de précision.

En quoi consistent précisément les recherches qui ont valu tant d'honneurs à Guye ? Comment se sont-elles déroulées ? Comment a évolué la pensée de Guye entre le début en 1907 et le mémoire de synthèse qu'il rédige en 1921, alors que les résultats annoncés par Arthur Stanley Eddington le 8 novembre 1919 offrent un statut nouveau à Einstein et, par suite, à ses théories ? Les articles publiés par Guye et ses étudiants Simon Ratnowsky et Charles Lavanchy, courtes annonces de résultats ou description détaillée du dispositif, des méthodes et des résultats, permettent dans la troisième partie de répondre à ces questions. Ces sources amènent également à porter un regard nouveau sur les résultats annoncés par Guye et Lavanchy, et considérés comme "les plus précis" dans les années 1920. La précision annoncée apparaît surfaite et susceptible de critiques ... qui n'ont à l'époque jamais été formulées.

Qu'une expérience soit accueillie favorablement malgré des défauts manifestes, ne manque pas de poser question. Mais cela semble aller dans le sens des conclusions de la première partie, et qui amènent à formuler l'une des hypothèses avancées dans ce travail pour expliquer la réception favorable des expériences de Guye. L'analyse de son dispositif et de ses mesures, et l'acceptation de ses conclusions, ne peuvent

se penser qu'en rapport avec les expériences réalisées à cette même époque. Les critiques dont ont fait l'objet Kaufmann, Bucherer et Hupka, ont mis en évidence les problèmes spécifiques à résoudre avant de conclure qu'une expérience de dynamique électronique parvient à départager les formules d'Abraham et de Lorentz-Einstein.

Dès lors, il convient d'analyser précisément les expériences, les conditions de leur mise en œuvre, leur réalisation et leurs résultats. Nous avons souscrit à l'hypothèse que les descriptions originales écrites ne se prêtent pas aisément à l'analyse historique car elles renferment des savoirs et savoir-faire implicites. La *méthode de réplication* [12] a montré que la vision de l'historien gagne en profondeur lorsqu'il se confronte de près au dispositif, aux instruments, aux méthodes de l'expérience originale. Initialement entourés et encouragés par le Groupe de Didactique et d'Histoire de la Physique de l'Université Carl von Ossietzky à Oldenburg en Allemagne et particulièrement par Peter Heering, nous avons entrepris la reconstruction de l'expérience de Guye et Lavanchy. Dans la quatrième partie de la thèse, nous racontons cette réplication, depuis la reconstruction d'un tube cathodique copie de celui de Guye et Lavanchy à la réalisation de mesures selon leur méthode. Nous expliquons comment l'échec scientifique — nous ne vérifions pas la formule de Lorentz-Einstein — nous apporte néanmoins des informations historiques cruciales pour évaluer l'expérience originale et sa réception. Nous mettons en évidence l'importance de la question de l'émission cathodique et les difficultés expérimentales qui en découlent.

Cette problématique expérimentale a été, pour nous, une difficulté majeure. Qu'en était-il pour Guye et Lavanchy ? L'un des risques auxquels se confronte l'historien lors d'une réplication d'expérience est de se mettre lui-même en scène [13]. Pour nous, cela aurait été de considérer nos difficultés à réaliser et maîtriser l'émission cathodique comme inhérentes à cette expérience, comme si, nécessairement, Guye et Lavanchy avaient dû y être confronté. C'est dans ce but — et il faut bien l'admettre avec une certaine curiosité — que nous avons cherché à en apprendre davantage.

Dans la cinquième et dernière partie de ce travail, nous rendons compte de la recherche effectuée dans le but d'éclaircir ce point. Nous montrons que loin d'être anecdotiques, les questions liées à l'émission des électrons occupent de nombreux expérimentateurs. Elles constituent un critère de classification des phénomènes d'émission, qui perdure jusque dans les années 1930, bien après l'accord sur l'universalité de la particule "électron". Ainsi, en abordant l'expérience de Guye et Lavanchy par

12. Heering (2006).
13. Pestre (1994, p. 18).

la “méthode de réplication”, nous montrons l'existence d'une problématique d'ordre expérimental —émettre des particules selon différentes techniques — qui ne se réduit pas au concept théorique d'électron. La réception de cette expérience doit alors être envisagée selon ce point de vue.

Le projet de réaliser une thèse sur Guye et ses expériences a pris corps naturellement au Département d'Histoire et Philosophie des Sciences de l'Université de Genève. Il a pu être concrétisé grâce à un financement privé proposé par M. Jean-Michel Pictet, puis poursuivi grâce au financement accordé par le Fonds national suisse de la recherche scientifique [14].

Les premiers mois ce travail, commencé en février 2004, furent consacrés à la collecte de différentes sources primaires écrites, au Musée d'Histoire des Sciences de Genève où sont conservées les archives de Charles-Eugène Guye, à l'Académie des sciences de Paris, aux Archives d'état de Genève qui contiennent les archives du Département de l'instruction publique, et au Dépôt des bibliothèques universitaires à Genève où sont conservés les procès verbaux des conseils de l'Université.

Pour mettre en œuvre la réplication de l'expérience de Guye et Lavanchy, nous avons bénéficié de la collaboration entière et précieuse du Musée d'histoire des sciences de Genève qui possédait deux exemplaires de tubes cathodiques et une machine électrostatique utilisés par Guye. Nos recherches dans les réserves du Musée ont également permis de retrouver une grande partie des clichés originaux à partir desquels ont été effectués les mesures de Guye et Lavanchy.

La reconstruction du dispositif puis de l'activité de mesure s'est déroulé entre l'automne 2004 et le printemps 2007 et a donc constitué la majeure partie de notre travail. Il est important de souligner que, de ce fait, les recherches que nous avons effectuées en parallèle étaient le plus souvent guidées par les questions posées par notre activité expérimentale. Sans préjuger de la qualité de notre travail, cela illustre le fait que selon nous, une réplication n'est pas qu'une affaire de manipulations ou de reconstruction, mais plutôt une façon d'étudier une expérience historique. Ainsi, notre réplication est un travail articulant analyse des descriptions de l'expérience et d'autres sources écrites directement liées [15] d'une part, reconstruction puis confrontation avec le dispositif expérimental d'autre part, et enfin recherche de nouvelles sources. Ces trois aspects ne sont pas trois étapes à suivre *a priori*. Chacun influe sur les deux autres, il y a interaction, allers et retours entre “table d'expérience” et

14. Subside n^{o}105211-105783.
15. Par exemple les articles de Kaufmann, Bucherer, Hupka et leurs critiques.

"table de lecture".

Ce travail a été réalisé en collaboration entre le Département d'Histoire et Philosophie des Sciences de l'Université de Genève et le Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Didactique et en Histoire des Sciences et des Techniques de l'Université Claude Bernard de Lyon.

1

Variation de l'inertie avec la vitesse

Sommaire

Introduction **14**

1.1 L'inertie électromagnétique : d'une possibilité théorique à un objectif programmatique **16**

1.1.1 Prémisses d'une conception électromagnétique de l'inertie . 16

1.1.2 Un nouveau programme de recherche : la conception électromagnétique globale de la physique 17

1.2 Première description électromagnétique de l'électron : la théorie d'Abraham **21**

1.2.1 Premières expériences de Kaufmann 21

1.2.2 Abraham répond aux conclusions de Kaufmann 22

1.2.3 La théorie de l'électron sphérique indéformable d'Abraham (1902-1903) 23

1.3 La théorie électromagnétique de Lorentz et le modèle de l'électron déformable **31**

1.3.1 La théorie électromagnétique de Lorentz avant 1899 31

1.3.2 La théorie de Lorentz en 1899 35

1.3.3 Le modèle de l'électron de Lorentz (1904) 38

1.4 L'électron déformable de Lorentz *versus* l'électron indéformable d'Abraham 43
1.4.1 Un problème de stabilité pour l'électron de Lorentz 43
1.4.2 Incompatibilité entre conception électromagnétique globale et impossibilité de détecter le mouvement absolu de la Terre 46
1.5 La théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein. Une conception différente de l'inertie ? 49
1.5.1 La masse transverse de l'électron dans la théorie d'Einstein : de la formule d'Einstein à la formule de Lorentz-Einstein 49
1.5.2 Théorie de Lorentz, théorie d'Einstein ou théorie de Lorentz-Einstein ? 53
1.6 Mesurer la variation de l'inertie de l'électron avec sa vitesse : une épopée qui n'aboutit pas ? 57
1.6.1 Pourquoi la question de l'inertie de l'électron est-elle si importante dans les années 1900-1910 ? 57
1.6.1.1 Les successeurs de Kaufmann 57
1.6.1.2 La variation de l'inertie de l'électron avec la vitesse : une question au cœur de plusieurs problématiques théoriques 58
1.6.2 Expériences sur la variation de l'inertie des électrons entre 1906 et 1916 60
1.6.2.1 L'expérience de Kaufmann (1906) et ses réceptions 60
1.6.2.2 Âpreté des débats autour des expériences sur la variation de l'inertie de l'électron avec la vitesse : les échanges Bucherer-Bestelmeyer (1908-1910) et Hupka-Heil (1909-1910) 65
1.6.2.3 Conclusion (provisoire) : les expériences de Schaefer et Neumann (1911-1914) et Guye et Lavanchy (1913-1916) 71
1.6.3 Analyse critique (mais non historique) des conclusions obtenues dans les années 1910 73
1.6.4 Pour une relecture historique des expériences des années 1910 77
1.6.4.1 Le point de vue des historiens 77
1.6.4.2 Réception des expériences de Neumann et de Guye et Lavanchy autour de 1920 78
1.6.4.3 Pistes pour une analyse historique de l'expérience de Guye et Lavanchy 83
Conclusion 85

> "*L'une des découvertes les plus étonnantes que les physiciens aient annoncées dans ces dernières années, c'est que la matière n'existe pas. Hâtons-nous de dire que cette découverte n'est pas encore définitive. L'attribut essentiel de la matière, c'est sa masse, son inertie. La masse est ce qui partout et toujours demeure constant, ce qui subsiste quand une transformation chimique a altéré toutes les qualités sensibles de la matière et semble en avoir fait un autre corps. Si donc on venait à démontrer que la masse, l'inertie de la matière ne lui appartenait pas en réalité, que c'est un luxe d'emprunt dont elle se pare, que cette masse, la constante par excellence, est elle-même susceptible d'altération, on pourrait bien dire que la matière n'existe pas. Or c'est là précisément ce qu'on annonce.*" [1]

Introduction

L'inertie de l'électron dépend-elle de sa vitesse ? Cette question, soulevée théoriquement dès 1881 par Joseph John Thomson, travaillée par Oliver Heaviside et quelques autres, acquiert à l'aube du XX^{e} siècle une importance capitale. En 1900 en effet, au cours des festivités organisées pour célébrer le 25ème anniversaire de la thèse de Hendrik Antoon Lorentz [2], Wien propose un programme de recherche nouveau prenant le contre-pied des recherches menées jusque là pour unifier les différentes théories physiques : réduire la mécanique à des concepts électromagnétiques. Il affirme alors toute l'importance de la question de la variation de l'inertie de l'électron avec la vitesse. Si l'inertie de l'électron est d'origine électromagnétique, alors, comme l'a montré Heaviside, elle doit être une fonction croissante de la vitesse.

D'un point de vue expérimental, la confirmation de cette hypothèse est apportée en 1902 par Kaufmann.

> "On doit donc regarder comme prouvé que *la masse de l'électron est entièrement électromagnétique* ; cela veut dire que *l'électron n'est autre chose qu'une charge électrique distribuée sur un volume ou une surface de dimensions très petites* (*environ* 10^{-13} *centimètres*)." [3]

1. Poincaré (1968, p. 246).
2. Dans sa thèse, Lorentz utilise la théorie de Maxwell et son interprétation par Helmholtz pour définir les conditions aux limites correctes entre deux milieux transparents. Il calcule ainsi les caractéristiques des rayons réfractés et réfléchis (intensité, direction). Cette thèse est traduite en français, voir Lorentz (1935-1939).
3. Kaufmann (1902b, p. 579).

Celui-ci va même plus loin puisqu'il affirme que ses mesures vérifient quantitativement les prédictions de son collègue théoricien Max Abraham fondées sur un modèle entièrement électromagnétique de l'électron.

La première conclusion de Kaufmann est confirmée par tous les expérimentateurs qui lui succèdent. La seconde va donner lieu à un débat passionnant auquel prendront part théoriciens de renom et expérimentateurs chevronnés.

À partir de 1904, Abraham n'est en effet plus le seul à proposer une expression mathématique de la variation de l'inertie avec la vitesse. Cette année là, Lorentz propose un nouveau modèle d'électron, déformable, et aboutit à une expression différente de celle d'Abraham.

L'année d'après, un nouvel acteur entre en jeu et propose, en abordant les choses de manière originale, une expression de la variation de l'inertie avec la vitesse similaire à celle de l'illustre physicien hollandais. Il s'agit d'Albert Einstein, qui verra ainsi son nom attaché à celui de Lorentz dans l'expression "formule de Lorentz-Einstein".

La question de la variation de l'inertie avec la vitesse se situe au croisement de débats théoriques et expérimentaux de premier ordre à l'époque. Est-il possible de réduire la physique à des concepts électromagnétiques ? Le principe de relativité est-il valide ? Comment décrire l'électron, particule supposée être le constituant fondamental de toute la matière ? Quelle méthode mettre en œuvre pour mesurer la variation de l'inertie sur des électrons accélérés à très haute vitesse ? Quel est le dispositif le mieux adapté à ces mesures ? Comment atteindre une précision jusque là encore inégalée ?

De nombreux travaux historiques existent qui analysent précisément les travaux d'Abraham, de Lorentz et d'Einstein, le développement du concept d'électron, les tentatives de réduire la physique à l'électromagnétisme, les expériences de Kaufmann... Ils constituent le socle fondamental sur lequel nous appuyons notre réflexion. Des points demeurent toutefois dans l'obscurité, particulièrement en ce qui concerne les expériences sur la variation de l'inertie des électrons avec leur vitesse après 1908.

Afin de comprendre le contexte scientifique dans lequel Guye évolue entre 1907 et 1921, il apparaît donc nécessaire de procéder en premier lieu à une relecture de ces études, menée sous l'angle spécifique de la question de la variation de l'inertie avec la vitesse. Ensuite, nous proposons une analyse des travaux expérimentaux contemporains de Guye

1.1 L'inertie électromagnétique : d'une possibilité théorique à un objectif programmatique

1.1.1 Prémisses d'une conception électromagnétique de l'inertie

L'hypothèse d'une origine électromagnétique de l'inertie trouve ses racines dans les travaux menés dans les deux dernières décennies du XIX^{e} siècle sur les phénomènes électromagnétiques associés au mouvement des charges électriques. En 1879, William Crookes fait l'hypothèse que les rayons cathodiques sont en fait constitués de particules chargées en mouvement [4]. L'effet magnétique de ce "courant de convection" est démontré expérimentalement en 1875 par Rowland qui montre l'action de la rotation rapide d'un disque chargé sur l'aiguille d'une boussole [5]. Ce n'est cependant qu'en 1881 qu'une analyse mathématique sur le sujet est proposée par J.J. Thomson, dans le cadre des travaux de Crookes. Malgré les erreurs qu'il comporte, ce travail constitue le point de départ pour notre étude de la mise en place d'une conception électromagnétique de la masse.

Les calculs de Thomson reposent sur deux hypothèses [6]. Premièrement, la densité surfacique de charge n'est pas modifiée par le mouvement des particules qu'il suppose sphériques. Deuxièmement, le champ électrique subit une translation dans le sens du mouvement sans que ses lignes de forces ne soient déformées. Autrement dit, le champ électrique est transporté sans altération avec la particule chargée. Thomson met ensuite en place le raisonnement suivant. Au repos, la particule est entourée de son champ électrostatique, dont on sait calculer l'énergie correspondante. Lorsqu'elle est en mouvement, elle donne naissance à un champ magnétique. L'énergie électromagnétique du champ entourant la particule est donc modifiée : un terme d'origine magnétique, *proportionnel au carré de la vitesse* de la particule, apparaît. Ainsi, pour mettre en mouvement cette particule, il faut, d'après le principe de conservation de l'énergie, fournir une énergie égale à la somme de l'énergie cinétique de la particule et l'énergie magnétique due au mouvement. Thomson propose alors l'analogie suivante, selon laquelle "tout se passe comme si" la masse inertielle de la particule chargée augmente avec le mouvement :

4. Il convient ici de se souvenir que la question de la nature des rayons cathodiques n'est alors pas résolue, et ne le sera qu'à la fin du XIX^{e} siècle. Cf partie 5.

5. Voir Darrigol (2000, p. 200). Cette question est discutée plus en détail par Buchwald (1985, p. 75-77).

6. Voir Jammer (1997, p. 136-138) pour une présentation succincte, et (Darrigol, 2000, p. 199-202) et Buchwald (1985, annexe 1, p. 269-277).

> "Autrement dit, cela [la mise en mouvement] est équivalent à une augmentation de la masse de la particule chargée." [7]

Le raisonnement de Thomson sera repris par ses successeurs, dont le travail consistera essentiellement à corriger les hypothèses et les calculs erronés. Les premières corrections sont apportées par Heaviside qui propose en 1885 une expression corrigée de la masse "apparente". Trois ans plus tard, celui-ci s'intéresse au cas de particules en mouvement rapide et montre que le champ électrique de la particule en mouvement est alors différent du champ électrostatique utilisé par Thomson. Toujours radial, ce champ électrique apparaît "comprimé" dans la direction du mouvement : ses composantes transverses sont plus intenses que sa composante longitudinale. De plus, les composantes de ce champ dépendent de la vitesse de la particule. Heaviside en déduit alors une expression nouvelle pour l'augmentation de la masse d'une particule chargée en mouvement. Au delà de ces corrections importantes, Heaviside envisage ses résultats différemment de Thomson. En effet, il parle de façon explicite de "force électrique d'inertie" [8], alors que Thomson ne pensait que par analogie. Par la suite, William Blair Morton et George Frederick Charles Searle poursuivent les travaux de Thomson et Heaviside. Morton montre que la répartition de la charge à la surface d'un conducteur quelconque n'est pas modifiée par le mouvement. Searle montre que le calcul de l'énergie électromagnétique qu'Heaviside effectue dans le cas d'une charge ponctuelle n'est pas valable pour une particule sphérique. Il effectue ce calcul dans différents cas, et en particulier il trouve dans le cas d'une sphère uniformément chargée en surface, en mouvement rectiligne à vitesse constante, une énergie totale [9]

$$W = \frac{e^2}{2a}\left(\frac{1}{\beta}\ln\frac{1+\beta}{1-\beta} - 1\right). \tag{1.1}$$

1.1.2 Un nouveau programme de recherche : la conception électromagnétique globale de la physique

Dans son ouvrage *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes*, Henri Poincaré (1854-1912) s'exprime ainsi :

7. Cité par Jammer (1997, p. 137) : "In other words, it must be equivalent to an increase in the mass of the charged moving sphere."

8. Jammer (1997, p. 141) : "For Heaviside, in contrast to Thomson, this increase of mass is a significant phenomenon, not only analogous to mechanical inertia but an inertial effect sui generis. In fact, Heaviside speaks explicitly of an "electric force of inertia"."

9. Ici, β est le rapport de la vitesse de la particule à la vitesse de la lumière, e est la charge totale de la particule et a son rayon.

> " Donner des phénomènes électriques une explication mécanique complète, réduisant les lois de la physique aux principes fondamentaux de la dynamique, c'est là un problème qui a tenté bien des chercheurs. N'est-ce pas cependant une question un peu oiseuse et où nos forces se consumeraient en pure perte ?" [10]

En effet, jusqu'à la fin du XIX^{e} siècle, de nombreuses tentatives d'explication mécanique aux phénomènes électromagnétiques sont proposées. Celles-ci reposent sur des modèles de plus en plus complexes de l'éther. Mais, au cours des années 1890, des propositions alternatives sont avancées. Peu à peu, la recherche d'une fondation de la physique sur des conceptions mécaniques est abandonnée. D'une part, comme le suggère Poincaré, une telle recherche s'avère très ardue, et l'objectif de la théorie électromagnétique devrait plutôt être l'établissement d'équations simples permettant de décrire les phénomènes [11]. D'autre part, une théorie électromagnétique fructueuse a été élaborée et commence à être largement diffusée, la théorie de Lorentz.

Dans le cadre de cette théorie, la matière est constituée de molécules composées de particules chargées mobiles qu'il nomme "ions" et d'une partie fixe. Lorentz fait l'hypothèse dès 1892 que ces ions ont un mouvement d'oscillation harmonique. Il peut alors prédire les fréquences optiques de certaines raies spectrales et en particulier les observations de Peter Zeeman sur la division des raies du sodium sous l'effet d'un champ magnétique en 1896 [12]. Cette prédiction nécessite une charge spécifique des "ions" environ 1000 fois supérieure à celle de l'ion hydrogène mesurée dans le phénomène d'électrolyse. Cette valeur est ainsi du même ordre de grandeur que la charge spécifique associée aux rayons cathodiques mesurée par Thomson, Emil Wiechert et Kaufmann entre 1897 et 1899.

En 1900, Lorentz propose une théorie électromagnétique de la gravitation [13]. S'ajoutant aux succès déjà nombreux de ses précédents travaux, et aux difficultés insurmontables dans la recherche d'explications mécaniques aux phénomènes électromagnétiques, celle-ci amène Wien à proposer un programme de recherche visant à asseoir la mécanique, et par la suite la physique en totalité, sur des bases électromagnétiques [14].

10. Poincaré (1899, p .5).
11. Cette interprétation est donnée par McCormmach (1970a, p. 461) : "The view was gaining that the present object of electromagnetic theory should not be to penetrate the mechanism, but to find the simplest equations for describing the phenomena".
12. Arabatzis (1992).
13. Pour plus de détails, voir McCormmach (1970a, p. 476-477).
14. Wien (1901).

Il importe de bien comprendre ce que signifie le programme de réductionnisme électromagnétique et l'abandon du primat des conceptions mécaniques. Il ne s'agit pas a priori de rejeter les lois de la mécanique. L'objectif est au contraire d'élaborer une théorie globale dans laquelle les lois du mouvement seront dérivées de l'interaction entre le champ électromagnétique et les particules chargées en mouvement. Dans le cadre de cette conception électromagnétique globale, les concepts premiers seront donc le champ électromagnétique, régi par les équations de la théorie de Maxwell-Lorentz, et la charge électrique. La masse, c'est-à-dire la grandeur qui rend compte de la propriété d'inertie, trouvera alors son origine dans l'auto-interaction de l'électron avec son champ. Dans le cadre d'une dynamique électromagnétique de l'électron, la force, le moment, le travail, l'énergie et la quantité de mouvement seront déduits du champ électromagnétique produit par l'électron en mouvement.

Au cœur de l'élaboration de ce programme réductionniste, la question de l'inertie de l'électron occupe une place fondamentale, tant pour des raisons théoriques que "pratiques". Dans les conceptions mécaniques, l'inertie est un concept *premier*, dont l'origine n'est pas discutée, alors que dans une conception électromagnétique, elle devient un concept *dérivé* des fondamentaux que sont les champs et la charge. Or, si l'accroissement apparent de l'inertie de l'électron en mouvement, dû à l'auto-interaction, est connu depuis 1881, il importe désormais de montrer que *toute* l'inertie de l'électron trouve son origine dans l'interaction entre les champs et la charge de l'électron. Autrement dit, il s'agit d'établir une dynamique électronique cohérente dans laquelle toute l'inertie, la masse, de l'électron est d'origine électromagnétique.

Or, l'inertie électromagnétique de l'électron dépend de sa vitesse, comme les travaux de Heaviside jusqu'à Searle l'on montré. Dès 1898, Théodor Des Coudres suggère de mesurer cette variation sur les rayons cathodiques. Autrement dit, la variation de l'inertie électromagnétique avec la vitesse offre une possibilité d'investigation expérimentale d'une dynamique électromagnétique de l'électron.

Dans son article qui fait figure d'un véritable programme de recherche, Wien fait référence aux mesures récentes de Philipp Lenard sur des rayons accélérés jusqu'à $\frac{1}{3}$ de la vitesse de la lumière. Dans celles-ci, Lenard rend compte d'une augmentation de l'inertie, mais ses mesures, trop peu nombreuses, sont entachées d'erreurs expérimentales trop importantes par rapport aux variations. De plus, la vitesse des rayons cathodiques n'est pas assez importante pour mesurer un accroissement significatif. Il est donc souhaitable de travailler sur des particules beaucoup plus rapides. Cette possibilité se présente peu après aux expérimentateurs avec l'identification des

rayons ß à des électrons émis à très grande vitesse.

1.2 Première description électromagnétique de l'électron : la théorie d'Abraham

1.2.1 Premières expériences de Kaufmann

En 1901, lorsqu'il se penche sur la question de l'inertie électromagnétique [15], Kaufmann est déjà un expérimentateur de renom de l'Université de Göttingen, spécialiste des rayons cathodiques et des rayons β. Il mesure les déviations électrique et magnétique de rayons ß émis à différentes vitesses et en déduit la charge spécifique associée. Il montre que celle-ci décroît avec la vitesse, c'est-à-dire que la masse augmente.

Ensuite, à partir de l'expression de l'énergie électromagnétique calculée par Searle (voir Eq. 1.1), il déduit la "masse apparente" μ_e issue de l'interaction entre l'électron en mouvement et le champ électromagnétique qu'il génère [16] :

$$\begin{aligned} \mu_e &= \frac{1}{v}\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}v} \\ \mu_e &= \frac{3}{4}\mu_0\frac{1}{\beta^2}\left(-\frac{1}{\beta}\ln\frac{1+\beta}{1-\beta}+\frac{2}{1-\beta^2}\right) \\ \mu_e &= \mu_0 f(\beta) \\ \mu_0 &= \frac{2}{3}\frac{e^2}{ac^2}. \end{aligned} \tag{1.2}$$

Comme il ne sait pas quelle fraction de la masse de l'électron est d'origine électromagnétique, il pose $M = m_0 + \mu_e$, où M est la masse totale et m_0 la masse " réelle " (i.e. la masse mécanique ou non-électromagnétique). Il exprime alors la charge spécifique $\frac{e}{M}$ en fonction de la vitesse :

$$\frac{e}{M} = \frac{e}{m_0 + \mu_0 f(\beta)}. \tag{1.3}$$

A partir de cinq mesures de la vitesse et de la charge spécifique correspondante, il détermine par la méthode des moindres carrés la fonction $\frac{e}{M}(\beta)$. Il en déduit finalement qu'environ le tiers de la masse totale de l'électron est d'origine électromagnétique. Cette première conclusion est d'une importance toute particulière puisqu'il est

15. Les détails du dispositif expérimental de Kaufmann sont donnés dans Miller (1981, p. 45-51).
16. μ_0 est la masse apparente lorsque la vitesse est nulle. C'est la masse électromagnétique de l'électron au repos.

non seulement démontré que l'inertie de l'électron varie effectivement avec la vitesse, mais encore que cette variation semble en accord avec le calcul de Searle et donc avec l'hypothèse d'une contribution électromagnétique à l'inertie. Cependant, ce premier pas de Kaufmann manque d'un support théorique suffisant et sa conclusion quant à la proportion de la contribution électromagnétique à l'inertie de l'électron n'est que provisoire.

1.2.2 Abraham répond aux conclusions de Kaufmann

Peu de temps après la publication des résultats expérimentaux de Kaufmann, son collègue théoricien Abraham propose en 1902 ce que Miller [17] appelle la "première théorie de champ d'une particule élémentaire", offrant ainsi le support théorique qui faisait défaut à l'expérimentateur. Le travail d'Abraham a pour objectif de répondre à la question suivante :

> "Est-il possible d'exprimer cette dépendance [de la masse à la vitesse] de façon quantitative à partir des équations différentielles du champ électromagnétique ?" [18]

Abraham s'inscrit explicitement dans la ligne directrice esquissée par Wien deux ans plus tôt. Il se demande en effet s'il est possible de prouver que *toute* l'inertie de l'électron trouve son origine dans l'interaction entre sa charge et son champ électromagnétique, et ainsi qu'une fondation de la mécanique sur des bases électromagnétiques est envisageable.

> "L'inertie de l'électron est-elle expliquée complètement par le comportement dynamique de son champ électromagnétique , sans l'aide d'une masse indépendante de sa charge électrique ? Ce n'est que lorsque l'on aura répondu par l'affirmative à ces questions que sera démontrée la possibilité d'une fondation électromagnétique de la mécanique." [19]

Pour mener à bien cette entreprise, il commence par critiquer les fondements théoriques de l'analyse de ses résultats par Kaufmann. La "masse apparente" dérivée du calcul de l'énergie électromagnétique de Searle ne peut qu'être associée à une

17. Miller (1981, p. 81).
18. Abraham (1902, p. 21) : "Ist es möglich, diese Abhängigkeit quantitativ aus den Differentialgleichungen des electromagnetischen Feldes abzuleiten ?"
19. Abraham (1902, p. 21) : "Ist die Trägheit des Electrons vollständig durch die dynamische Wirkung seines electromagnetischen Feldes zu erklären, ohne eine von der electrischen Ladung unabhängige Masse zur Hilfe zu nehmen ? Nur wenn diese Fragen bejahend beantwortet werden, ist die Möglichkeit einer rein electromagnetischen Begründung der Mechanik anzuerkennen."

force longitudinale alors que, dans le dispositif expérimental, les déviations sont transverses, c'est-à-dire orthogonales à la vitesse des électrons. Abraham montre en effet que la masse, si elle varie avec la vitesse, s'exprime par un tenseur de rang 2. Autrement dit, l'inertie diffère selon que la force extérieure appliquée est colinéaire ou orthogonale à la vitesse. Il nomme "masse longitudinale" et "masse transverse" les masses associées respectivement à une force "dans la direction du mouvement" et "dans la direction normale au mouvement" [20].

Kaufmann prend acte des corrections d'Abraham et analyse à nouveau ses données. Il conclut à l'accord entre ses mesures et les prédictions théoriques et affirme que *toute* la masse de l'électron est d'origine électromagnétique.

1.2.3 La théorie de l'électron sphérique indéformable d'Abraham (1902-1903)

À l'aube du XX^e siècle, Abraham est l'un des meilleurs spécialistes de la théorie électromagnétique et du maniement de ses équations. Après sa thèse effectuée sous la direction de Max Planck à Berlin, il est nommé à l'Université de Göttingen en 1900. Collègue de Kaufmann, il est ainsi amené à s'intéresser aux questions de dynamique de l'électron. Grâce à une parfaite maîtrise du calcul vectoriel, il applique les équations du champ électromagnétique à ce problème et développe sa contribution la plus importante : la théorie de l'électron indéformable [21].

Le travail d'Abraham repose sur les hypothèses suivantes [22] :

A Les équations de Maxwell sont valides. Il existe un référentiel dans lequel les ondes électromagnétiques se déplacent à la vitesse de la lumière dans le vide, c.

B Il existe des électrons positifs et négatifs qui assurent le lien entre éther et matière.

C Le courant électrique est un mouvement de convection de ces électrons. Ce mouvement génère un champ magnétique.

D La force exercée par le champ électromagnétique sur une charge électrique est donnée par la force de Lorentz (Eq. 1.8)

20. Nous les noterons respectivement μ_1 et μ, suivant en cela les notations d'Abraham et adoptées par Guye.

21. On trouvera une présentation plus détaillée de la vie et du travail de Max Abraham dans Goldberg (1970). Pour une exposition plus précise de sa théorie de l'électron, voir Miller (1973, p. 214-219) et Miller (1981, p. 51-57).

22. Ces hypothèses sont rappelées par Goldberg (1970, p. 19). Il fait référence à Abraham (1904a), qui est une réponse à la théorie de l'électron de Lorentz.

E Les forces électromagnétiques extérieures et celle due à l'électron lui-même sont en équilibre au sens de la mécanique des corps rigides [23]

F L'électron conserve sa forme.

G L'électron est une sphère chargée uniformément en volume ou en surface [24]

Retraçons rapidement le raisonnement d'Abraham. Nous choisissons de ne pas suivre l'ordre logique tel qu'il se présente dans l'article *Prinzipien der Dynamik des Elektrons* [25] dans lequel il présente sa théorie de façon très détaillée. Nous allons plutôt dégager les points importants de sa pensée. En effet, Abraham ne cherche pas uniquement à calculer la masse électromagnétique de l'électron. Il a comme objectif plus vaste de montrer comment, à partir des hypothèses fondamentales [26], il est possible de fonder toute une dynamique électromagnétique de l'électron, dans laquelle ses mouvements peuvent être déduits de la fonction de Lagrange du champ électromagnétique propre de l'électron.

Dans ce cadre là, l'établissement de formules reliant la masse de l'électron à sa vitesse représente plutôt une possibilité de vérification expérimentale qu'un aspect théorique fondamental. Pour Abraham, l'électron est une sphère rigide qui se déplace selon les lois de la cinématique classique. S'il avait laissé la possibilité d'une déformation de l'électron, l'objectif d'une fondation électromagnétique de la physique aurait été nié puisque la cohésion d'un électron déformable devrait alors être assurée par des forces d'origine non-électromagnétiques venant compenser l'action répulsive des forces de Coulomb [27].

Les propriétés électromagnétiques de l'électron d'Abraham sont résumées par les

23. Nous proposons ici notre propre traduction du texte d'Abraham : "Die elektromagnetischen Kräfte des äusseren und des vom Elektron selbst erregten Feldes halten sich an dem Elektron im Sinne der Mechanik starrer Körper das Gleichgewicht." Abraham (1904a, p. 576). La traduction proposée par Goldberg nous apparaît en effet peu claire : "The external electromagnetic forces and the electromagnetic forces of the field excited by the electron itself depend upon the electron in the sense of the mechanics of rigid bodies in equilibrium " Goldberg (1970, p.19).

24. La description précise de la répartition de la charge électrique sur ou dans l'électron n'a que peu d'influence sur les calculs qui suivent.

25. Abraham (1903).

26. Rappelons ici le titre de l'article d'Abraham : "Die Grundhypothesen der Elektronentheorie".

27. En fait, un modèle d'électron purement électromagnétique *et* déformable sera proposé en 1904 par Adolf Bucherer, puis indépendamment en 1905 par Paul Langevin. Henri Poincaré montrera que, dans ce modèle dit de Bucherer-Langevin, l'électron déformable est stable.

équations de Maxwell-Lorentz,

$$\vec{\nabla}\vec{E} = 4\Pi\rho \tag{1.4}$$

$$\vec{\nabla}\vec{B} = \vec{0} \tag{1.5}$$

$$\vec{\nabla}\mathrm{x}\vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \tag{1.6}$$

$$\vec{\nabla}\mathrm{x}\vec{B} = 4\Pi\rho\vec{v} + \frac{1}{c}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}, \tag{1.7}$$

l'expression de la force dite de Lorentz

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v}\mathrm{x}\vec{B}, \tag{1.8}$$

et des potentiels scalaire et vecteur satisfaisant à la condition de jauge de Lorentz

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\Phi - \frac{1}{c}\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} \tag{1.9}$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla}\mathrm{x}\vec{A} \tag{1.10}$$

$$\vec{\nabla}\vec{A} + \frac{1}{c}\frac{\partial\Phi}{\partial t} = 0. \tag{1.11}$$

Ces équations sont supposées s'exprimer sous cette forme dans un référentiel fixe par rapport à l'éther.

Abraham montre ensuite que les forces extérieures à l'électron sont en équilibre avec celles dues aux champs propres de la particule, puisque l'électron n'est pas déformable et qu'il suppose que toute la masse est d'origine électromagnétique. D'où :

$$\vec{F}_{ext} + \vec{F}_{int} = \vec{0}, \tag{1.12}$$

où [28]

$$\vec{F}_{int} = \int \rho \mathrm{d}\tau \vec{F}_{Lorentz}. \tag{1.13}$$

Par un calcul du travail de cette force appliquée à l'électron, il identifie l'énergie

28. La notation $\vec{F}_{int}$ ne doit pas porter à confusion et laisser penser qu'il s'agit de forces "internes". Nous les avons nommées ainsi car Abraham parle de "inneren Kräften".

de l'électron à l'énergie de son champ électromagnétique :

$$W = \frac{1}{8\Pi}\int (E^2 + B^2)\mathrm{d}\tau \tag{1.14}$$
$$W = W_e + W_m$$
$$W_e = \frac{1}{8\Pi}\int E^2\mathrm{d}\tau$$
$$W_m = \frac{1}{8\Pi}\int B^2\mathrm{d}\tau,$$

et l'impulsion de l'électron à la quantité de mouvement de son champ électromagnétique [29] :

$$\vec{G} = \frac{1}{4\Pi c}\int (\vec{E}\mathrm{x}\vec{B})\mathrm{d}\tau. \tag{1.15}$$

En utilisant les relations Eq. 1.13 et Eq. 1.15 il montre également que

$$\vec{F}_{int} = -\frac{\mathrm{d}\vec{G}}{\mathrm{d}t}. \tag{1.16}$$

En injectant la relation Eq. 1.16 dans Eq. 1.12, il obtient l'équation du mouvement de l'électron :

$$\vec{F}_{ext} = \frac{\mathrm{d}\vec{G}}{\mathrm{d}t}. \tag{1.17}$$

Abraham est parvenu à établir une équation du mouvement de l'électron sphérique indéformable soumis à des forces extérieures, en identifiant l'énergie et l'impulsion de l'électron à l'énergie et la quantité de mouvement de son champ électromagnétique. A partir de cette relation, il peut désormais calculer la masse électromagnétique de l'électron, pour autant que cette grandeur soit définie convenablement.

Pour ce faire, il suppose le mouvement quasi-stationnaire [30] Physiquement cela signifie que toute variation de la vitesse de l'électron se fait sur une durée négligeable devant le temps mis par l'onde électromagnétique alors générée pour se propager

29. Abraham est le premier à utiliser le concept de quantité de mouvement du champ électromagnétique dans une théorie de l'électron. C'est cependant Poincaré qui, déjà en 1900, en avait reconnu l'importance, dans sa tentative de préserver la validité de la loi de l'action et de la réaction Poincaré (1900).

30. Cela permet en effet de négliger les termes radiatifs proportionnels aux dérivées d'ordre supérieur à 1 de l'accélération dans l'expression de l'impulsion.

"d'un point à l'autre de l'électron"[31]. Ce n'est qu'au prix de cette approximation qu'il peut maintenir la forme usuelle de la seconde loi de Newton et la définition de la masse comme le coefficient de l'accélération. Il décompose alors le mouvement selon que la force extérieure appliquée est longitudinale ou transverse[32]. Alors, comme $\vec{G}$ est colinéaire à $\vec{u}_1$ [33],

$$\frac{\mathrm{d}\vec{G}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}t}\vec{u}_1 + G\frac{v}{r}\vec{u}$$
$$\frac{\mathrm{d}\vec{G}}{\mathrm{d}t} = \mu_1 a_1 \vec{u}_1 + \mu a \vec{u}.$$

Or,

$$a_1 = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$
$$a = \frac{v^2}{r},$$

et

$$\frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}v}\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}.$$

D'où,

$$\frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}v}\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \mu_1\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$
$$G\frac{v}{r} = \mu\frac{v^2}{r}.$$

Il obtient alors pour les expressions générales pour les masses longitudinale et transverse :

$$\mu_1 = \frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}v} \tag{1.18}$$
$$\mu = \frac{G}{v}. \tag{1.19}$$

31. Pour une démonstration de cette assertion, voir Miller (1973, p. 283-284). Notons que cette approximation constitue une limite d'applicabilité de la dynamique électromagnétique d'Abraham.

32. On notera $\vec{u}$ le vecteur unitaire orthogonal au vecteur vitesse, et $\vec{u}_1$ le vecteur unitaire tangent à la vitesse. De même, les accélérations normale et tangentielle seront notées respectivement $a\vec{u}$ et $a_1\vec{u}_1$.

33. Pour être plus précis, on peut dire que $\vec{G}$ est proportionnel à $\vec{v}$, dans chacune des théories de l'électron proposées. Nous retrouvons ainsi les formules de cinématique classique, dans lesquelles r est le rayon de courbure au point considéré.

Nous comprenons maintenant comment Abraham peut calculer la masse électromagnétique de l'électron. Il reste néanmoins à trouver la valeur de la quantité de mouvement du champ électromagnétique, ce qu'Abraham parvient à faire en montrant qu'il peut écrire ses équations sous une formulation lagrangienne. Il prouve en effet que la grandeur

$$L = W_m - W_e \tag{1.20}$$

peut être identifiée à la fonction de Lagrange du mouvement de l'électron et qu'il retrouve les expressions

$$\vec{G} = \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\vec{v}} \tag{1.21}$$

$$W = -L + \vec{v}\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\vec{v}}. \tag{1.22}$$

Alors, le calcul de l'impulsion $\vec{G}$ revient au calcul de la fonction de Lagrange L. Abraham montre [34] que l'étude du mouvement absolu de l'électron (dans le référentiel S lié à l'éther dans lequel les équations du champ électromagnétique sont valables) peut être ramenée à l'étude d'un ellipsoïde de révolution uniformément chargé et au repos dans un référentiel S' lié à l'électron en mouvement et défini par :

$$\begin{aligned} x' &= \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} x_r \\ y' &= y_r \\ z' &= z_r. \end{aligned}$$

En effet, dans le référentiel S_r lié à l'électron, l'équation de d'Alembert sur le potentiel scalaire s'écrit [35] :

$$(1-\beta^2)\frac{\partial^2\Phi}{\partial x_r^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y_r^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z_r^2} = -4\Pi\rho.$$

Cette équation se ramène alors à une équation de Poisson dans S' :

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z'^2} = -4\Pi\rho.$$

34. Lorentz a montré la même chose en 1895.
35. Les indices r font référence aux grandeurs mesurées dans le référentiel attaché à l'électron.

Ainsi, à l'électron sphérique indéformable en mouvement absolu, correspond un ellipsoïde allongé (dans la direction du mouvement de l'électron) au repos dans S'. Abraham montre que l'énergie électrostatique W'_e d'un tel ellipsoïde permet d'obtenir le Lagrangien associé au mouvement de l'électron

$$L = -(1-\beta^2)^{\frac{1}{2}} W'_e. \tag{1.23}$$

Abraham trouve l'expression de cette énergie électrostatique dans le *Traité* de Maxwell. Il obtient donc la valeur du Lagrangien associé au mouvement d'un électron soumis à son propre champ électromagnétique,

$$L = -k\frac{e^2}{a}\frac{1-\beta^2}{2\beta} ln \frac{1+\beta}{1-\beta}, \tag{1.24}$$

où $k = \frac{1}{2}$ dans le cas d'une répartition surfacique de la charge, et $k = \frac{3}{5}$ dans le cas d'une répartition volumique. D'où finalement, grâce aux relations 1.21, 1.18 et 1.19, il trouve les expressions pour les masses longitudinale et transversale :

$$\mu_1 = \frac{3}{4}\mu_0 \frac{1}{\beta^2}\left(-\frac{1}{\beta}\ln\frac{1+\beta}{1-\beta} + \frac{2}{1-\beta^2}\right) \tag{1.25}$$

$$\mu = \frac{3}{4}\mu_0 \frac{1}{\beta^2}\left(\frac{1+\beta^2}{2\beta}\ln\frac{1+\beta}{1-\beta} - 1\right), \tag{1.26}$$

avec [36]

$$\mu_0 = \frac{4}{3}k\frac{\epsilon^2}{a}. \tag{1.27}$$

Abraham semble ainsi avoir réussi à ériger une théorie électromagnétique de l'électron, fondée sur l'interaction entre son champ et sa charge. Il est parvenu également à en donner une expression sous forme lagrangienne. A ce sujet, il s'exprime ainsi :

> "[...] *nous avons dérivé la mécanique analytique de Lagrange à partir des équations fondamentales de la dynamique de l'électron. Ce résultat n'est pas significatif seulement du point de vue de la théorie de la connaissance, mais également d'un point de vue économique puisque cela ramène la dynamique de n'importe*

36. Par commodité et selon les notations en vigueur à l'époque, nous noterons ϵ le rapport $\frac{e}{c}$, c'est-à-dire la charge de l'électron en unités électromagnétiques.

quel type de mouvement au calcul de la fonction de Lagrange."[37]

Tout au long des années 1902-1903, Kaufmann cherche à améliorer ses résultats expérimentaux, tout en prenant en compte le développement de la théorie d'Abraham dans l'analyse de ses mesures. Ainsi, après avoir corrigé son utilisation erronée de la masse longitudinale au lieu de la masse transverse, il travaille sur le dispositif expérimental et sur la méthode de traitement des mesures.

En octobre 1903, Carl Runge critique le fait que Kaufmann n'ait pas soumis ses mesures à une analyse par la méthode des moindres carrés mais se soit contenté d'effectuer des moyennes arithmétiques sur ses points de mesures. Cette analyse sera considérée comme en faveur de sa théorie par Abraham en 1905.

1903 est également l'année où les rayons cathodiques sont utilisés pour l'étude de l'inertie de l'électron. Dans un domaine de vitesse s'étendant de 0,07 à 0,38 c environ, Hermann Starke mesure la vitesse et la masse des électrons émis par rayonnement cathodique et conclut, avec de sérieuses réserves quant à la précision de ses résultats, à l'accord avec les prédictions théoriques d'Abraham.

La situation évolue de façon notable en 1904 avec la parution de l'article de Lorentz *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity less than that of light.*

37. Abraham (1903, p. 168 ; italiques originales) : "*. . . , haben wir die analytische Mechanik Lagranges aus den Grundgleichungen der Dynamik des Elektrons hergeleitet. Dieses Resultat ist nicht nur von erkenntnistheoretischer, sondern auch von ökonomischer Bedeutung, weil es die Dynamik jener Bewegungen auf die Berechnung der Lagrangeschen Funktion zurückführt.*" Cité également par Miller (1981, p. 55).

1.3 La théorie électromagnétique de Lorentz et le modèle de l'électron déformable

1.3.1 La théorie électromagnétique de Lorentz avant 1899

Nous avons rappelé précédemment que la théorie de Lorentz semble, au début du XX^{e} siècle, être la théorie électromagnétique la plus aboutie. Elle comble l'une des principales lacunes de la théorie de Maxwell : l'interaction entre le champ électromagnétique et des particules microscopiques chargées en mouvement dans un éther au repos présent dans tout l'espace permet de comprendre l'interaction entre la lumière et la matière. Elle permet de rendre compte de l'absence d'effets dus au mouvement de la Terre sur les phénomènes optiques (expérience de Michelson et Morley, 1887). Enfin, Lorentz s'attaque au problème de l'interaction gravitationnelle dans le cadre de sa théorie électromagnétique.

Pour Miller, Lorentz n'adhère pas immédiatement au programme réductionniste proposé par Wien et supporté entre autres par Abraham et Kaufmann [38]. Pour autant, il s'intéresse à l'inertie électromagnétique et à sa contribution à la masse totale de l'électron. Il finit même, en 1904, par proposer sa propre "théorie de l'électron", dont la principale différence avec la théorie d'Abraham est de supposer un électron déformable.

La théorie de l'électron de Lorentz est intimement liée au développement plus général de sa théorie électromagnétique au cours des années 1890. Le titre de l'article de 1904 est en ce sens assez révélateur. Son objectif n'est pas, à la différence d'Abraham, d'établir une "dynamique électromagnétique de l'électron", mais bien d'"étendre sa théorie électromagnétique pour y inclure le mouvement d'électrons libres" [39].

L'une des questions essentielles posée par Lorentz concerne l'application de la théorie électromagnétique aux corps en mouvement. En 1895, Lorentz expose sa

38. Miller (1981, p. 63) : "Pendant la période 1900-1903, Lorentz interroge la possibilité qu'une partie de la masse de l'électron libre puissent être d'origine électromagnétique, bien qu'il soit alors encore quelque peu réservé quant à une description électromagnétique globale." ("During the period 1900-1903 Lorentz discussed the possibility that some of the free electron's mass could be of electromagnetic origin, although he was as yet somewhat cautious about supporting an electromagnetic world-picture.")

39. Miller (1981, p.63) : "[. . .] to extend his electromagnetic theory to include the motion of free electrons." Notons que jusqu'alors, Lorentz ne s'était intéressé qu'aux électrons harmoniquement liés au sein de la matière, en tant qu'ils étaient le siège de perturbations électromagnétiques permettant d'expliquer les phénomènes de l'optique des corps en mouvement et l'interaction éther/matière.

théorie sous le titre *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*. Dans cet Essai, il déduit les résultats qu'il avait déjà exposé en 1892 de façon systématique, en partant des équations du champ électromagnétique et de l'expression de la force exercée par l'éther sur les ions chargés qui constituent selon lui la matière. En particulier, il donne une méthode générale pour ramener les problèmes électrodynamiques à des problèmes électrostatiques, et démontre que les lois de l'électromagnétisme sont valables dans les référentiels en mouvement par rapport à l'éther à l'ordre $\frac{v}{c}$.

Ce problème peut être présenté comme ceci. Les équations de Maxwell-Lorentz (Eq. 1.4 à 1.7) sont valables par rapport au référentiel S lié l'éther. Ainsi, une onde électromagnétique est régie par une équation d'onde, valable dans S. Une transformation galiléenne des vitesses du référentiel S à S_r modifie la forme de cette équation. Ce n'est plus une équation d'onde, elle n'a plus la forme correcte pour décrire la propagation d'une onde électromagnétique. Ceci est en contradiction avec les observations selon lesquelles le mouvement de la Terre par rapport à l'éther ne peut être mis en évidence.

Pour rendre compte de ces observations, et ainsi construire une théorie électromagnétique en cohérence avec les expériences, Lorentz démontre alors le théorème qu'il nomme "théorème des états correspondants", valable uniquement à l'ordre $\frac{v}{c}$, et dans le cas où l'espace n'est pas chargé. Celui-ci peut s'exprimer ainsi : "S'il existe dans S un état de mouvement caractérisé par les champs $\vec{E}_0$ et $\vec{B}_0$ fonctions de (x_0, y_0, z_0, t_0), alors il existe un état correspondant dans S' caractérisé par les champs $\vec{E}'$ et $\vec{B}'$ qui sont les mêmes fonctions des nouvelles variables (x_r, y_r, z_r, t_L) ". Les champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$, fonctions de (x_r, y_r, z_r, t_0) sont ensuite définis par :

$$\vec{E}' = \vec{E} + \frac{\vec{v}}{c}\mathrm{x}\vec{B} \tag{1.28}$$

$$\vec{B}' = \vec{B} - \frac{\vec{v}}{c}\mathrm{x}\vec{E}. \tag{1.29}$$

Les coordonnées dans les référentiels S et S' sont liées par :

$$\begin{aligned} x' &= x_0 - vt_0 \\ y' &= y_0 \\ z' &= z_0 \\ t_L &= t_0 - \frac{v}{c^2}x_0. \end{aligned}$$

Autrement dit, les équations de l'électromagnétisme sont valables dans les référentiels en mouvement, à l'ordre $\frac{v}{c}$, si l'on utilise la variable t_L pour le temps. Lorentz appelle cette variable le "temps local" ("Ortszeit"[40]). Pour Lorentz, cette nouvelle variable n'a pas de signification physique. Elle intervient comme un artifice mathématique dans le théorème des états correspondants qui, appliqué aux expériences d'optiques précises à l'ordre $\frac{v}{c}$ dans lesquelles sont mesurées des figures d'interférence, justifie que le système de franges (la figure d'interférence) observé dans le référentiel du laboratoire (S_r) est le même que celui qui serait obtenu dans S. Ces expériences ne peuvent alors pas mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther immobile[41].

Que se passerait-il dans le cas d'une expérience dont la précision atteindrait l'ordre $\frac{v^2}{c^2}$? Une telle expérience a été réalisée en 1887 par deux physiciens américains, Albert Michelson et Edward Morley. Il s'agit de la célèbre expérience d'interférométrie censée déceler les effets du second ordre du mouvement de la Terre par rapport à l'éther (le "vent d'éther"). Lorentz a critiqué en 1886 la première version de cette expérience réalisée en 1881 par Michelson. Dans celle-ci, ce dernier concluait à l'absence d'effets du second ordre, mais Lorentz corrige une erreur de calcul de l'expérimentateur et en déduit que le dispositif expérimental n'est pas suffisamment précis pour conclure d'une quelconque façon.

Dans l'expérience de 1887, Michelson et Morley tiennent compte de cette remarque de Lorentz et améliorent leur dispositif en conséquence. Ils n'observent toujours aucun effet. Jusqu'en 1892, Lorentz ne parvient pas à expliquer le résultat négatif des expérimentateurs américains.

> "Cette expérience m'a troublé pendant longtemps, et je ne vois finalement qu'un moyen de réconcilier son résultat avec la théorie de Fresnel."[42]

Lorentz entend préserver un éther stationnaire et considère comme valide la loi d'addition des vitesses. Il propose alors l'hypothèse selon laquelle le bras de l'interféromètre parallèle au déplacement de la Terre se contracte[43]. Sa longueur l devient $l(1-\beta^2)^{\frac{1}{2}} < \mathrm{l}$. Cette hypothèse de contraction est proposée indépendamment

40. Voir Darrigol (1994, p. 288).

41. Le temps local dépend de la vitesse v, ce qui pourrait laisser penser qu'il est possible de mesurer cette vitesse par la mesure de ce temps. Rappelons que les figures d'interférence résultent de moyennes temporelles sur des durées grandes devant la période d'oscillation des ondes lumineuses. Pour plus de détails à ce sujet, voir Janssen (1995, partie 3 ; p. 17).

42. Cité par Miller (1981, p. 28) : "This experiment [Michelson and Morley] has been puzzling me for a long time, and in the end I have been able to think of only one means of reconciling it with Fresnel's theory."

43. Dans le référentiel S lié à l'éther, la vitesse de l'onde lumineuse vaut c dans toutes les direc-

par George Francis Fitzgerald. Lorentz est conscient du caractère ad hoc de cette hypothèse, aussi propose-t-il d'en montrer le caractère "plausible", pour reprendre l'expression d'Abraham [44]. Si l'on suppose que les forces d'interaction entre les molécules constituant un corps solide se comportent vis à vis du mouvement comme la force de Lorentz qui s'exerce entre des particules chargées, alors l'équilibre de ces forces ne peut se faire que si les distances intermoléculaires sont diminuées d'un facteur $1-\beta^2$ dans le sens du mouvement. Lorentz concède que la nature des forces intermoléculaires étant encore inconnue, cette hypothèse est quelque peu "aventureuse" [45].

Ainsi, pour étendre l'invariance des équations du champ électromagnétique de l'ordre $\frac{v}{c}$ à l'ordre $\left(\frac{v}{c}\right)^2$, Lorentz pose une hypothèse nouvelle. Devra-t-il en faire autant à chaque passage à l'ordre d'approximation suivant ? C'est en substance ce que lui reproche Henri Poincaré lorsqu'il écrit en 1902 :

> "On a fait des expériences qui auraient dû déceler les termes du premier ordre ; les résultats ont été négatifs ; cela pouvait-il être par hasard ? Personne ne l'a admis ; on a cherché une explication plus générale, et Lorentz l'a trouvée ; il a prouvé que les termes du premier ordre devaient se détruire, mais il n'en n'était pas de même de ceux du second. Alors on a fait des expériences plus précises ; elles ont aussi été négatives ; ce ne pouvait être non plus l'effet du hasard ; il fallait une explication ; on l'a trouvée ; on en trouve toujours ; les hypothèses, c'est le fonds qui manque le moins.
>
> Mais ce n'est pas assez ; qui ne sent que c'est encore là laisser au hasard un trop grand rôle ? Ne serait-ce pas aussi un hasard que ce singulier concours

tions. On note l la longueur du bras de l'interféromètre, et v la vitesse de déplacement de la Terre par rapport à l'éther. Le rayon émis à l'instant t_0 atteint le miroir placé sur le bras parallèle au temps t_0+t_1. On peut exprimer la distance parcourue comme $d = ct_1$. Cette distance est égale à la longueur du bras à laquelle se rajoute la distance parcourue par l'interféromètre pendant t_1. On a donc $ct_1 = l + vt_1$. De même, pour le trajet retour, dont la durée vaut t_2, on a $ct_2 = l - vt_2$. Le temps de trajet total, dans la direction parallèle vaut donc $t_1 + t_2 = 2\frac{l}{c(1-\beta^2}} = t_3$. Le rayon lumineux réfléchi sur le second miroir n'est pas dans la direction du bras orthogonal au déplacement de la Terre, du fait de ce déplacement. On calcule sa longueur comme l'hypoténuse du triangle rectangle de côtés $\frac{1}{2}vt_4$, l, où t_4 est la durée du trajet aller-retour. Posant $\gamma^2 = (1-\beta^2)^{-\frac{1}{2}}$, on a alors $t_4 = 2\frac{l}{c(1-\beta^2)^{\frac{1}{2}}}$. Alors, $\delta t = t_3 - t_4 = 2\frac{l}{c}\gamma(\gamma-1)$. Or, le résultat de l'expérience de Michelson et Morley affirme que $\delta t = 0$. Lorentz observe que, si l'on exclue la possibilité $v = 0$ (l'éther se déplace avec la Terre), on retrouve $\delta t = 0$ si la longueur du bras dans le sens du mouvement devient $l(1-\beta^2)^{\frac{1}{2}}$.

44. Voir Abraham (1904a, p. 577) : "Man kann die Hypothese [...] plausibel machen, indem man die Molekularkräfte als elektrische Kräfte deutet."

45. Cité par Miller (1981, p. 29, souligné par nous) : "One may of course not attach much importance to this result ; the application to molecular forces of what was found for electric forces is too *venturesome* for that."

> qui ferait qu'une certaine circonstance viendrait juste à point pour détruire les termes du premier ordre, et qu'une autre circonstance, tout à fait différente, mais tout aussi opportune, se chargerait de détruire ceux du second ordre ? Non, il faut trouver une même explication pour les uns et les autres, et alors tout nous porte à penser que cette explication vaudra également pour les termes d'ordre supérieur, et que la destruction mutuelle de ces termes sera rigoureuse et absolue." [46]

Poincaré pense que seuls les mouvements relatifs des corps matériels sont observables. Le mouvement de la Terre par rapport à l'éther ne l'est donc pas. Pour lui, cela signifie que, dans une théorie électromagnétique consistante avec ce "principe de relativité", les équations du champ sont invariantes à tous les ordres en $\frac{v}{c}$. La théorie de Lorentz telle qu'exposée dans son *Essai* n'est donc pas encore complète.

1.3.2 La théorie de Lorentz en 1899

En 1892 et 1895, Lorentz a établi le "théorème des états correspondants" à l'ordre $\frac{v}{c}$, un "outil mathématique qui permet de résoudre les problèmes d'électrodynamique dans un référentiel galiléen en mouvement dans l'éther" [47]. Pour expliquer l'expérience de Michelson et Morley, il a avancé l'hypothèse dite de contraction des longueurs. Entre 1898 et 1904, en plus des critiques de Poincaré, des expériences ou des suggestions d'expériences amènent Lorentz à approfondir sa réflexion autour de l'hypothèse de contraction des longueurs, et plus généralement autour de l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement absolu de la Terre. Entre 1899 [48] et 1904 [49], il parvient ainsi à établir une formulation générale du théorème des états correspondants et à étendre la portée de l'hypothèse de contraction.

En 1899, Lorentz tente de répondre à une critique formulée par Alfred Liénard l'année précédente [50] : l'expérience de Michelson et Morley donnerait sans doute un résultat positif si la lumière traversait un milieu diélectrique le long de l'un des bras de l'interféromètre. Dans le cadre de sa théorie telle qu'exposée avant 1899, Lorentz ne peut y parvenir car l'hypothèse de contraction n'exprime qu'une modification des longueurs des objets en mouvement par rapport à l'éther. En particulier, elle ne dit

46. Poincaré (1968, p. 182-183).
47. Janssen (1995, partie 3, p. 10). Le travail de Janssen sur la construction de la théorie de Lorentz nous semble rendre compte des subtilités et de l'évolution de la pensée du physicien hollandais de la manière la plus claire.
48. Lorentz (1899).
49. Lorentz (1952 [1904]).
50. Liénard (1898).

rien des particules qui constituent ces objets [51].

Dans l'article de 1899, Lorentz développe ce qui constituera en partie la structure du travail de 1904. Il montre tout d'abord que les équations de l'électromagnétisme pour les champs sont invariantes quelque soit l'ordre en $\frac{v}{c}$ vis à vis du changement de variables suivant [52] :

$$\begin{aligned} x' &= l\gamma x_r \\ y' &= y_r \\ z' &= z_r \\ t' &= l\gamma t - l\gamma \frac{v}{c^2} x, \end{aligned}$$

avec les champs $\vec{E}'(x', y', z', t')$ et $\vec{B}'(x', y', z', t')$ donnés par les formules :

$$\vec{E}' = diag(\frac{1}{l^2}, \frac{1}{l^2}, \gamma\frac{1}{l^2})(\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c}\mathrm{x}\vec{B}) \tag{1.30}$$

$$\vec{B}' = diag(\frac{1}{l^2}, \frac{1}{l^2}, \gamma\frac{1}{l^2})(\vec{B} - \frac{\vec{v}}{c}\mathrm{x}\vec{E}). \tag{1.31}$$

Ces transformations forment ce qu'il convient d'appeler une généralisation du théorème des états correspondants [53]. Mais ce théorème seul ne suffit pas à expliquer l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement absolu de la Terre [54]. Janssen montre que Lorentz, en 1899, généralise également l'hypothèse de contraction. Il ne s'agit plus simplement d'une contraction des longueurs, mais d'une affirmation plus forte selon laquelle "des états correspondants se transforment physiquement de l'un à l'autre" [55]. Cette "hypothèse de contraction généralisée" devient alors une conséquence de la transformation des forces (électromagnétiques et autres) dans un système en mouvement :

51. Pour répondre à Liénard, Lorentz doit montrer comment l'indice de réfraction est modifié par le mouvement. Voir Janssen (1995, partie 3, p. 30).

52. l est une fonction de β qui diffère de 1 d'une quantité du second ordre en $\frac{v}{c}$. À la notation près — nous utilisons celle de 1904 — ce sont les mêmes variables qu'utilise Lorentz en 1904. Rappelons que le référentiel S_r est en mouvement par rapport à l'éther. Le système de coordonnées S' correspond pour Lorentz à un référentiel fictif dans lequel les équations du champ sont les mêmes que dans le système S lié à l'éther. Les référentiels S_r et S sont liés par la transformation galiléenne des référentiels.

53. Janssen (1995, partie 3 ; p. 42).

54. Janssen (1995, partie 3 ; p. 49-54) montre comment le théorème des états correspondants, bien que généralisé, ne suffit pas pour expliquer l'absence d'effet du mouvement de la Terre sur les expériences d'optique.

55. Janssen (1995, partie 3 ; p. 48) : "corresponding states physically transform into one another."

> "l'effet de contraction généralisée, la transformation physique des états correspondants de l'un à l'autre, n'est pas une notion primitive pour [Lorentz] mais est dérivée de l'action des forces [agissant entre les particules du système et l'éther]." [56]

Autrement dit, l'hypothèse de contraction généralisée implique nécessairement la contraction des longueurs supposée en 1892. Celle-ci s'écrit maintenant [57] :

$$L_x = \frac{1}{\gamma l} L_{x_0} \tag{1.32}$$

$$L_y = \frac{1}{l} L_{y_0} \tag{1.33}$$

$$L_z = \frac{1}{l} L_{z_0}. \tag{1.34}$$

Elle implique également que la masse des électrons varie avec la vitesse. En effet, dans le référentiel S, l'oscillation d'un électron de la source de lumière, de masse au repos μ_0, satisfait la seconde loi de Newton $F_0(x_0, y_0, z_0, t) = \mu_0 a_0 = \mu_0 \frac{\mathrm{d}^2 x_0}{\mathrm{d}t^2}$. D'après le théorème des états correspondants, le mouvement de l'électron dans le référentiel S' sera le même et devra satisfaire à la même loi de Newton $F'(x', y', z', t') = \mu_0 a' = \mu_0 \frac{\mathrm{d}^2 x_0}{\mathrm{d}t^2}$ [58]. Lorentz souhaite conserver une expression similaire de la seconde loi de Newton pour les grandeur réelles (mesurées dans le référentiel S_r). Il suppose de plus que les forces qui s'exercent au sein de la matière se transforment comme la force de Lorentz, soit :

$$\vec{F}' = diag(\frac{1}{l^2}; \frac{\gamma}{l^2}; \frac{\gamma}{l^2})\vec{F}. \tag{1.35}$$

Si l'on suppose enfin que le mouvement d'oscillation de l'électron est suffisamment lent, l'accélération se transforme alors comme

$$\vec{a}' = diag(\frac{\gamma^3}{l}; \frac{\gamma^2}{l}; \frac{\gamma^2}{l})\vec{a}.$$

56. Janssen (1995, partie 3 ; p. 56-57) : "[...] the genralized contraction effect, the physical transformation of corresponding states into one another, is not a primitive notion for him, but is to be derived form the action of forces." Lorentz s'exprime ainsi : "as soon as the translation is given to it, the transformation really takes place, of itself, i.e. by the action of the forces acting between the particles of the system, and the aether.", cité par Janssen (1995, partie 3 ; p. 54).

57. L_x, L_y, L_z sont les longueurs dans le référentiel en mouvement ; L_{x_0}, L_{y_0}, L_{z_0} sont les longueurs dans le référentiel fixe dans l'éther. Le mouvement se fait selon l'axe $\vec{u}_x$.

58. D'après le théorème des états correspondants, $\vec{F}'$ est la même fonction de $(\vec{x}', t')$ que $\vec{F}_0$ de $(\vec{x}_0, t)$.

Ainsi,

$$diag(\frac{1}{l^2};\frac{\gamma}{l^2};\frac{\gamma}{l^2})\vec{F} = \mu_0 diag(\frac{\gamma^3}{l};\frac{\gamma^2}{l};\frac{\gamma^2}{l})\vec{a}.$$

D'où l'on déduit

$$\vec{F} = \mu_0 diag(\gamma^3 l;\gamma l;\gamma l)\vec{a}. \tag{1.36}$$

Il apparaît alors que la masse d'un électron en mouvement à la vitesse v par rapport à l'éther dépend de cette vitesse et de la direction de la force à laquelle il est soumis :

$$\mu = \mu_0 diag(\gamma^3 l;\gamma l;\gamma l). \tag{1.37}$$

Bien que l'idée soit "surprenante", elle n'est pas choquante en 1899 suite aux travaux de J.J. Thomson, Heaviside, Searle et Morton dont nous avons parlé au paragraphe 1.1.1 :

> " Une telle hypothèse peut paraître à première vue surprenante. Cependant, nous ne sommes pas forcés de la rejeter complètement. En effet, il est bien connu que la masse *effective* d'un ion dépend de ce qui se déroule dans l'éther ; elle peut donc tout à fait être modifiée par une translation, et même de différentes façons pour des vibrations dans des directions différentes." [59]

1.3.3 Le modèle de l'électron de Lorentz (1904)

En 1899, Lorentz n'a pas déduit la variation de la masse de l'électron d'un modèle de cette particule. Cette notion apparaît plutôt comme une conséquence nécessaire de sa tentative de formuler une théorie électromagnétique qui rende compte de l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement absolu de la Terre. "En conséquence, en 1899 Lorentz n'a pas étendu l'hypothèse de contraction des objets matériels [bulk matter] à l'[électron]" [60]. Il ne le fera pas avant 1904.

Pour Abraham, les nouvelles hypothèses de Lorentz remplacent les hypothèses

59. Lorentz (1899, p. 442 ; italiques originales) : "Such a hypothesis seems startling at first sight. Nevertheless we need not wholly reject it. Indeed, as is well known, the *effective* mass of an ion depends on what goes on in the aether ; it may therefore very well be altered by a translation and even to different degrees for vibrations of different directions."

60. Miller (1981, p. 63) : "Consequently, in 1899 Lorentz had not extended the hypothesis of contraction from bulk matter to the ion." En 1899, Lorentz ne parle pas encore d'électron mais d'ion.

F et G de sa théorie de l'électron indéformable par les hypothèses suivantes [61] :

H Tous les corps subissent une contraction dans la direction du mouvementé [62].

I Toutes les forces se transforment comme la force de Coulomb [63].

K L'électron sphérique lorsqu'il est au repos voit ses dimensions affectées par le mouvement selon les relations Eq. 1.32 à 1.34 [64].

L La masse d'une molécule est de nature électromagnétique.

Pour Lorentz, l'hypothèse de contraction de l'électron constitue donc un fondement de sa théorie électromagnétique qui devient ainsi une "théorie de l'électron".

Le calcul de Lorentz de la masse de l'électron en mouvement repose sur le calcul de la quantité de mouvement du champ électromagnétique généré par l'électron en mouvement. Celle-ci est égale à l'impulsion de la particule si la masse de l'électron est d'origine purement électromagnétique. On retrouve le début de l'exposé d'Abraham. La situation est toutefois plus simple pour Lorentz du fait de la contraction supposée de l'électron [65].

La quantité de mouvement $\vec{G}$, toujours définie par la relation 1.15, s'exprime en fonction des grandeurs dans S' (voir les relations 1.30 et 1.31 [66]) comme :

$$\vec{G} = \frac{\gamma l v}{4\Pi c^2} \int (E'^2_y + E'^2_z) \mathrm{d}t'. \tag{1.38}$$

Dans le référentiel lié à l'éther, l'électron au repos est sphérique. Du fait de l'hypothèse de contraction, l'électron est également sphérique et au repos dans l'état correspondant du système S'. Le champ électrique $\vec{E}'$ se calcule donc comme :

$$\vec{E}' = \frac{e}{r'^2} \vec{u}_r. \tag{1.39}$$

61. Il nous semble que Goldberg se trompe lorsqu'il dit que les hypothèses H — L de Lorentz remplacent les hypothèses E - G d'Abraham : "Lorentz [...] had [...] made several other assumptions in lieu of assumptions E — G". En effet, Abraham écrit : "E bleibt bestehen." (Abraham, 1904a, p. 578).

62. Cette hypothèse permet à Lorentz de déterminer la valeur du coefficient l qui intervient dans ses transformations : $l = 1$.

63. C'est l'hypothèse exprimée par la relation 1.35.

64. Abraham utilise en fait l'hypothèse H de Lorentz pour écrire les relations 1.32 à 1.34 avec $l = 1$.

65. Il faut bien voir que la situation est plus simple pour Lorentz en ce qui concerne le calcul de G, mais qu'il ne parvient à ce stade qu'après avoir étudié les transformations entre les différents systèmes de référence des coordonnées et des champs.

66. Il faut inverser ces relations en tenant compte du fait que, dans S', l'électron est au repos, ce qui implique que $\vec{B}' = \vec{0}$. De plus, l'intégrale sur l'espace des composantes de $\vec{E}\mathrm{x}\vec{B}$ selon les axes perpendiculaires à la direction du mouvement est nulle par raison de symétrie.

Ainsi,

$$E'^2_y + E'^2_z = \frac{2}{3}\frac{e^2}{r'^4},$$

et

$$\begin{aligned} \vec{G} &= \frac{2}{3}\frac{e^2}{ac^2}\gamma l\vec{v} \\ \vec{G} &= \frac{2}{3}\frac{\epsilon^2}{a}\gamma l\vec{v}. \end{aligned} \tag{1.40}$$

Lorentz peut alors calculer les masses longitudinale et transverse comme les coefficients d'inertie selon que la force extérieure $\vec{F_{ext}}$ est exercée dans le direction du mouvement ou dans la direction orthogonale. En procédant de la même manière qu'Abraham, on a alors

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}v} \\ \mu_1 &= \frac{2}{3}\frac{\epsilon^2}{a}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}v}(\gamma lv), \end{aligned} \tag{1.41}$$

et

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{G}{v} \\ \mu &= \frac{2}{3}\frac{\epsilon^2}{a}\gamma l. \end{aligned} \tag{1.42}$$

Posant la masse de l'électron au repos comme la limite de ces expressions pour $v \to 0$, Lorentz trouve

$$\mu_0 = \frac{2}{3}\frac{\epsilon^2}{a} \tag{1.43}$$

C'est la même expression trouvée par Abraham (Eq. 1.27) dans l'hypothèse d'un électron sphérique indéformable chargé uniformément en surface [67].

Il reste à déterminer l afin de trouver une expression exacte de la masse de l'électron en mouvement. La relation 1.36, combinée à l'expression de μ_1 (Eq. 1.41)

67. A ce stade, nous n'avons pas d'explication sur le choix de Lorentz d'un électron chargé en surface plutôt qu'en volume.

implique que[68]

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\gamma l v) = \gamma^3 l. \tag{1.44}$$

D'où, $\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}v} = 0$ et ainsi $l = 1$ car l est défini comme différant de 1 d'une quantité d'ordre $\left(\frac{v}{c}\right)^2$. Finalement, la masse de l'électron en mouvement, dans l'hypothèse où l'électron se contracte, est définie par les relations :

$$\mu_1 = \frac{2}{3}\frac{\epsilon^2}{a}\gamma^3$$

$$\mu_1 = \mu_0\gamma^3 \tag{1.45}$$

$$\mu_1 = \mu_0(1-\beta^2)^{-\frac{3}{2}}, \tag{1.46}$$

et

$$\mu = \frac{2}{3}\frac{\epsilon^2}{a}\gamma$$

$$\mu = \mu_0\gamma \tag{1.47}$$

$$\mu = \mu_0(1-\beta^2)^{-\frac{1}{2}}. \tag{1.48}$$

Lorentz aboutit donc à une expression de la masse d'un électron en mouvement différente de celle calculée par Abraham. Il en est conscient, tout comme il sait que les résultats de Kaufmann sont avancés comme une confirmation des prédictions du théoricien allemand.

> "Les valeurs (30) [Eqs. 1.46 et 1.48] que j'ai trouvées pour les masses longitudinale et transverse d'un électron, exprimées selon sa vitesse, ne sont pas les mêmes que celles obtenues précédemment par Abraham. Cette différence tient uniquement au fait que, dans sa théorie, les électrons sont traités comme des sphères de dimensions invariables. Mais, en ce qui concerne la masse transverse, les résultats d'Abraham ont été confirmés de la façon la plus remarquable par les mesures de Kaufmann sur la déflection de rayons [β] du radium dans des champs électrique et magnétique. Ainsi, s'il n'y a pas d'objection des plus sérieuses à la théorie que je propose maintenant, il doit être possible de montrer que ces mesures s'accordent avec les valeurs presque aussi bien qu'avec celles d'Abraham."[69]

68. Il importe de remarquer que la condition exprimée par la relation 1.36 repose sur l'hypothèse de contraction généralisée puisque la relation 1.36 en est déduite.

69. Lorentz (1952 [1904], p. 30-31) : "The values (30), which I have found for the longitudinal and transverse masses of an electron, expressed in terms of its velocity, are not the same as those

Dans le dernier paragraphe de son article, il confronte ses prédiction aux mesures de Kaufmann publiées en 1902 et 1903 et à l'analyse de Runge publiée également en 1903. Il montre que ses prédictions "ne sont pas moins satisfaisantes" que celles d'Abraham dans le cas des mesures de 1902, d'autant plus qu'elles sont en nombre trop insuffisant [70]. Il poursuit en disant qu'il n'a "pas trouvé le temps de calculer les autres tableaux dans l'article de Kaufmann". Cependant, il note leur similarité avec ceux qu'il a pu calculer et dont il a montré qu'ils s'accordaient aussi bien avec sa théorie qu'avec celle d'Abraham, et conclut qu'il peut en "attendre un accord satisfaisant avec sa formule" [71].

Peu de temps après la publication de l'article de Lorentz, Kaufmann qui est à Bonn depuis 1903, écrit à Lorentz pour lui demander de lui en faire parvenir une copie. Il a en effet pu confronter la théorie de Lorentz à ses mesures, avec l'aide d'Abraham. Il lui semble que la théorie de Lorentz s'accorde mieux aux mesures que celles d'Abraham. Il promet de reprendre son expérience en améliorant la précision, "du fait de la grande importance de tout ce problème" [72].

La nouvelle confrontation des théories de Lorentz et d'Abraham avec l'expérience ne pourra se faire avant 1906 et la reprise de son expérience par Kaufmann. Entre temps, de nouveaux acteurs entrent en jeu et c'est sur le plan théorique que le débat a lieu.

---

that had been previously obtained by Abraham. The ground for this difference is to be sought solely in the circumstance that, in his theory, the electrons are treated as spheres of invariable dimensions. Now, as regards the transverse mass, the results of Abraham have been confirmed in a most remarkable way by Kaufmann's measurements of the deflection of radium-rays in electric and magnetic fields. Therefore, if there is not to be a most serious objection to the theory I have now proposed, it must be possible to show that those measurements agree with my values nearly as well as with those of Abraham."

70. Pour les détails sur les mesures de Kaufmann (avant 1906) et leur interprétation vis à vis des théories d'Abraham et de Lorentz, voir Miller (1981, p. 44-51 et p. 57-62).

71. Comme le souligne Abraham (1904a, p. 578), "H. A. Lorentz montre que sa formule pour la masse transverse ne s'accorde pas plus mal que la mienne avec les recherches de Kaufmann."; "H. A. Lorentz zeigt, dass seine Formel für die transversale Masse mit den Versuchen Kaufmanns nicht erheblich schlechter stimmt, als die meinige."

72. Cet épisode est rapporté par Miller (1981, p. 70). C'est la première et dernière fois que Kaufmann favorise la théorie de Lorentz plutôt que celle d'Abraham.

1.4 L'électron déformable de Lorentz *versus* l'électron indéformable d'Abraham

1.4.1 Un problème de stabilité pour l'électron de Lorentz

Dès 1902, Abraham entrevoit un problème crucial dans le cas d'un électron déformable. Il pense en effet que seul un électron *rigide* [73] peut ne pas exploser sous l'effet de la répulsion coulombienne entre ses parties. Ainsi, l'hypothèse de contraction de l'électron dans la théorie de Lorentz lui semble poser un problème sérieux :

> "Si l'on accélère un tel électron [déformable], il va s'aplatir ; il doit donc fournir un travail contre les forces électriques. Alors que pour l'électron indéformable, l'augmentation de l'énergie est identique au travail fourni par les forces électriques extérieures, ce n'est ici plus le cas ; l'apport d'énergie pour augmenter la vitesse est plus grand que le travail des forces extérieures." [74]

Pour comprendre ce que signifie cet argument contre l'électron déformable, il apparaît nécessaire de revenir au calcul de la masse longitudinale de l'électron en mouvement.

Dans les théories d'Abraham et de Lorentz, l'hypothèse de la nature électromagnétique de la masse de l'électron signifie que l'énergie du champ électromagnétique de l'électron est égale à l'énergie de l'électron. De même, la quantité de mouvement du champ électromagnétique est égale à l'impulsion de l'électron. Si ces hypothèses sont vérifiées, alors la masse longitudinale se calcule soit par la relation 1.18

$$\mu_1 = \frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}v},$$

soit par la relation suivante (Eq. 1.49) [75] :

$$\mu_1 = \frac{1}{v}\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}v}. \tag{1.49}$$

73. Pour Abraham, la notion de *rigidité* est à entendre comme une notion première, un postulat, dans le sens de la mécanique de Hertz. Elle s'exprime par le fait que l'électron garde sa forme sphérique. On peut penser ces contraintes comme des forces infinies qui ne travaillent pas.

74. Abraham (1904a, p. 578) : "Beschleunigt man ein solches Elektron, so wird seine Abplattung vermehrt ; es muss also gegen die elektrischen Kräfte Arbeit geleistet werden. Während für das undeformierbare Elektron die Zunahme der Energie gleich der von den äusseren elektrischen Kräften geleisteten Arbeit ist, findet das hier nicht mehr statt ; die Energiezunahme bei einer Geschwindigkeitsvermehrung ist grösser, als die Arbeit der äusseren Kräfte." Abraham (1904b) développe ces idées dans le détail.

75. En effet, $W = -L + vG$. Donc $\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}v} = -\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}v} + G + v\frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}v}$. Or $G = \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}v}$, d'où $\frac{1}{v}\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}v} = \frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}v} = \mu_1$.

Dans la théorie de Lorentz, l'identité de ces deux relations n'est pas vérifiée. Abraham le montre explicitement en 1905 [76] en calculant G pour l'électron déformable de Lorentz, à partir du lagrangien par la relation 1.21 d'une part, et par sa définition en fonction des champs électrique et magnétique [Eq. 1.15] d'autre part. Cette dernière expression est utilisée par Lorentz qui obtient la relation [Eq. 1.40] :

$$\vec{G}_{EM} = \frac{4}{3}\frac{\epsilon^2}{2a}\gamma v.$$

Calculé de la première façon, on trouve

$$G_{Lagrange} = \frac{\epsilon^2}{2a}\gamma v. \tag{1.50}$$

L'hypothèse d'un électron soumis à la contraction de Lorentz n'est donc pas compatible avec une formulation Lagrangienne de la théorie. Comment interpréter cette "inconsistance", dont la résolution est considérée par Lorentz lui-même comme d'une importance fondamentale [77] ?

Abraham montre que l'énergie du champ électromagnétique d'un électron dans la théorie de Lorentz vaut :

$$\begin{aligned} W_{EM} &= \frac{1}{3}\frac{e^2}{2a}\gamma(4 - \frac{1}{\gamma^2}) \\ W_{EM} &= \frac{2}{3}\frac{\epsilon^2}{a}\gamma c^2 - \frac{1}{4}\frac{2}{3}\frac{\epsilon^2}{a}\gamma^{-1}c^2. \end{aligned} \tag{1.51}$$

Il calcule alors la grandeur $\frac{1}{v}\frac{\mathrm{d}W_{EM}}{\mathrm{d}v}$ et trouve :

$$\begin{aligned} \frac{1}{v}\frac{\mathrm{d}W_{EM}}{\mathrm{d}v} &= \frac{2}{3}\frac{\epsilon^2}{a}\left(\gamma^3 + \frac{1}{4}\gamma\right) \\ \frac{1}{v}\frac{\mathrm{d}W_{EM}}{\mathrm{d}v} &= \gamma^3\mu_0 + \frac{1}{4}\gamma\mu_0 \\ \frac{1}{v}\frac{\mathrm{d}W_{EM}}{\mathrm{d}v} &= \mu_1 + \frac{1}{4}\mu. \end{aligned} \tag{1.52}$$

Le second terme du membre de droite dans la relation 1.52 vient du terme $-\frac{1}{4}\frac{2}{3}\frac{\epsilon^2}{a}\gamma^{-1}c^2$ de la relation 1.51. Autrement dit, dans la théorie de l'électron de Lorentz, il est incorrect d'identifier l'énergie totale de l'électron avec l'énergie de son champ élec-

76. Abraham (1923). Miller nous apprend qu'avant la publication de son ouvrage, Abraham fait part de ses calculs à Lorentz dans une lettre du 26 janvier 1905 ; Miller (1981, p. 72).

77. Voir Miller (1973, p. 231, note 59).

tromagnétique (Eq. 1.51).

La critique d'Abraham, citée au début du présent chapitre, peut maintenant s'interpréter en calculant le travail des forces extérieures pendant une durée dt comme [78] :

$$\begin{aligned}\delta W_{ext} &= \vec{F}_{ext}.\vec{v}dt \\ &= \frac{\mathrm{d}\vec{G}_{EM}}{\mathrm{d}t}.\vec{v}dt \\ &= \frac{\mathrm{d}\vec{G}_{EM}}{\mathrm{d}\vec{v}}\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}\vec{v}dt \\ &= \mu_1\vec{v}.d\vec{v},\end{aligned}$$

et en observant que

$$\begin{aligned}\mathrm{d}W_{EM} &= \mu_1\vec{v}d\vec{v} + \frac{1}{4}\mu\vec{v}d\vec{v} \\ &= \delta W_{ext} + \frac{1}{4}\mu\vec{v}d\vec{v}.\end{aligned} \tag{1.53}$$

Autrement dit, augmenter la vitesse, c'est-à-dire augmenter l'énergie du champ électromagnétique, nécessite un travail que les seules forces extérieures ne peuvent accomplir : "l'apport d'énergie pour augmenter la vitesse est plus grand que le travail des forces extérieures". Pour ce faire, et maintenir le principe de conservation de l'énergie, l'électron de Lorentz doit avoir une énergie totale

$$W_{tot} = W_{EM} + \frac{1}{4}\left(\frac{2}{3}\frac{\epsilon^2}{a}\right)\gamma^{-1}c^2. \tag{1.54}$$

Alors seulement aura-t-on $\mathrm{d}W_{tot} = \delta W_{ext}$, ce qui assure que dans le cas où le travail des forces extérieures est nul, l'énergie de l'électron est constante.

Abraham identifie ce problème comme venant de la déformation à volume variable de l'électron de Lorentz lors de sa mise en mouvement [79]. Pour assurer la stabilité de l'électron, il doit exister des forces de cohésion d'origine non-électromagnétique contribuant d'une quantité $\frac{1}{4}\frac{2}{3}\frac{\epsilon^2}{a}\gamma^{-1}c^2$ à l'énergie totale de l'électron. Poincaré montre

78. Abraham a montré que dans un modèle purement électromagnétique, $\vec{F}_{ext} = \frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}t}$; cf. Eq. 1.17.

79. Dans le cas d'une déformation à volume constant, un modèle électromagnétique cohérent de l'électron est envisageable. C'est l'électron de Bucherer-Langevin, proposé indépendamment par Bucherer en 1904 et Langevin en 1905. Nous ne nous attardons pas ici sur ce modèle. Il sera en effet rejeté par ses concepteurs du fait de son incompatibilité avec le principe de relativité. Guye ne l'évoque dans aucun de ses articles.

en 1905 que cette force "peut être assimilée à une pression [intérieure] [80] constante, agissant sur l'électron déformable et compressible, et dont le travail est proportionnel aux variations du volume de cet électron" [81]. Cette pression intérieure n'est pas d'origine électromagnétique. La théorie de l'électron proposée par Lorentz n'est donc pas compatible avec la possibilité d'une conception électromagnétique globale. Seule la théorie d'Abraham l'est [82].

1.4.2 Incompatibilité entre conception électromagnétique globale et impossibilité de détecter le mouvement absolu de la Terre

Le "principe de relativité" tel qu'il est compris par Lorentz et Poincaré peut s'exprimer de la manière suivante : dans un référentiel en mouvement à la vitesse v par rapport à l'éther, les équations du champ électromagnétique sont invariantes à tous les ordres en $\frac{v}{c}$. Lorentz en fait une conséquence de sa théorie, en accord avec les expériences qui ne parviennent pas à mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther. Poincaré y voit une nécessité d'ordre épistémologique [83].

Dans le cadre de la théorie de Lorentz, l'impossibilité de détecter le mouvement absolu de la Terre par des expériences électriques ou optiques repose sur un certain nombre d'hypothèses desquelles découle ce que nous avons appelé l'hypothèse de contraction généralisée. Dans ce contexte, seul un électron qui se contracte dans la direction du mouvement d'un facteur $(1-\beta^2)^{\frac{1}{2}}$ tout en maintenant ses dimensions transversales — autrement dit, l'électron postulé par Lorentz — est compatible avec l'hypothèse de contraction généralisée et plus généralement avec un principe de relativité tel qu'énoncé plus haut [84].

Le problème soulevé par Abraham tient en ce qu'un tel électron n'est pas stable. En 1904, la théorie de Lorentz souffre ainsi d'une incohérence interne, qui sera résolue par Abraham et Poincaré en 1905 : il doit exister à l'intérieur de l'électron de Lorentz un mécanisme produisant une pression interne propre à assurer la stabilité

80. Miller (1973, p. 300) rappelle que dans la version abrégée de son article "Sur la dynamique de l'électron", publiée en 1905 dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, Poincaré écrit "pression extérieure". Cette erreur est corrigée dans la version complète publiée dans *Rendiconti del circolo matematico di Palermo* en 1906 (Poincaré, 1906). Elle est répétée dans la réimpression dans *La mécanique nouvelle* en 1924 (Poincaré, 1989).

81. Poincaré (1989, p. 20) qui est une réimpression de Poincaré (1906).

82. Avec celle de Bucherer-Langevin.

83. Nous renvoyons le lecteur à la discussion sur l'épistémologie de Poincaré par Miller (1973, p. 233-246).

84. Voir note 68.

de l'électron en mouvement. La théorie de Lorentz n'est donc pas compatible avec la mise au point d'une conception électromagnétique globale [85].

Pour Abraham, la possibilité d'une conception électromagnétique globale est d'une importance capitale. Il en est l'un des principaux avocats. Ainsi, malgré les formules complexes auxquelles il aboutit, il pense que sa théorie repose sur des bases simples et il y voit également une possibilité d'unifier les différents domaines de la physique autour des concepts de champ électromagnétique et de charge électrique. Au contraire, il juge la théorie de Lorentz plus compliquée car elle nécessite d'introduire des forces de cohésion dont on ignore la nature. Qui plus est, cette théorie ne permet pas l'unification autour des seuls concepts issus de l'électromagnétisme.

Cependant, la théorie de l'électron d'Abraham ne parvient pas à rendre compte des échecs à détecter le mouvement absolu de la Terre. Abraham en est tout à fait conscient. En particulier, il admet qu'il ne peut rendre compte de l'expérience de Michelson et Morley sans accepter au moins la contraction de Lorentz-Fitzgerald. La situation apparaît encore plus problématique vis à vis des expériences de Rayleigh et Brace [86] que seule la théorie de Lorentz telle que présentée en 1904 parvient à expliquer.

Lorentz exprime des doutes quant à la validité de sa propre théorie. En 1904, il précise qu'elle est "avancée avec toutes les réserves d'usage" ["with all due reserve"] [87]. Il concède que l'hypothèse de contraction de l'électron ne peut être "en elle-même" considérée comme "plausible ou inadmissible", puisque l'état des connaissances sur cette particule est extrêmement ténu [88].

Il est également conscient que sa théorie ne cadre pas avec la possibilité d'une

85. Rappelons que l'électron de Bucherer-Langevin est également compatible avec une conception électromagnétique globale, mais pas avec le principe de relativité.

86. En 1902, Lord Rayleigh cherche à tester l'hypothèse de contraction telle que posée en 1899 par Lorentz. Selon elle, la masse de l'ion [l'électron] dépend de la direction de la force à laquelle il est soumis. Ainsi, les ions oscillant sous l'effet de l'onde électromagnétique lumineuse étant à l'origine de la réfraction de la lumière à la traversée de deux milieux diélectriques, un milieu diélectrique isotrope devrait présenter une double réfraction à l'ordre 2 en $\frac{v}{c}$. Rayleigh n'observe pas cette double réfraction. Deux ans plus tard, DeWitt Bristol Brace reproduit l'expérience de Rayleigh avec une précision bien meilleure, mais toujours sans signe d'une quelconque double réfraction. Miller (1981, p. 64 et p. 71).

87. Lorentz (1952 [1904], p. 29).

88. Lorentz (1952 [1904], p. 29-30) : "Notre hypothèse sur la contraction des électrons ne peut être en elle-même considérée comme plausible ou inadmissible. Ce que nous savons de la nature des électrons est très limité, et le seul moyen de réaliser des avancées sera de tester les hypothèses que j'ai faites ici." ("Our assumptions about the contraction of electrons cannot in itself be pronounced to be either plausible or inadmissible. What we know about the nature of electrons is very little, and the only means to push our way farther will be to test such hypotheses as I have here made.").

conception électromagnétique globale. Pour autant, il n'est pas prêt à la remettre en cause de ce seul fait [89].

Finalement, aussi bien Lorentz qu'Abraham en appellent à une décision expérimentale pour trancher entre les trois modèles d'électron, et plus généralement entre les visions théoriques différentes qu'ils expriment. Ceci est assez bien résumé par Abraham qui écrit en 1904 [90] :

> "Nous espérons que les recherches que W. Kaufmann reprend maintenant avec une persévérance inlassable fourniront de nouveaux éclaircissements."

89. L'attitude de Lorentz vis à vis de la conception électromagnétique globale semble difficile à cerner. Les commentaires des historiens sur le sujet sont quelque peu divergents. Selon McCormmach (1970a, p. 476), vers 1900, Lorentz s'inscrit dans cette conception. Miller (1973, p. 212) corrobore cette interprétation puisque selon lui, Lorentz s'engage "immédiatement" dans la direction annoncée par Wien en 1900. Toujours selon Miller (1973, p. 314), Lorentz ne commencera à avoir des doutes sur le programme électromagnétique qu'en 1921. Janssen (1995, partie 3, p. 70 , note 87) doute de cette dernière assertion de Miller, et avance que Lorentz a pris "tôt" ses distances avec le programme électromagnétique ("early reservations about program of Wien and Abraham to develop a purely electromagnetic worldview."). Cette dernière interprétation nous semble plus cohérente.

90. Abraham (1904a, p. 578-579) : "Es ist zu hoffen, dass die Versuche, die W. Kaufmann jetzt mit unermüdlicher Ausdauer wieder aufnimmt, weitere Aufschlüsse geben werden."

1.5 La théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein. Une conception différente de l'inertie ?

1.5.1 La masse transverse de l'électron dans la théorie d'Einstein : de la formule d'Einstein à la formule de Lorentz-Einstein

Avant la parution des nouveaux résultats de Kaufmann en 1906, un article est envoyé à la revue *Annalen der Physik*. Il s'intitule "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" et est rédigé par Albert Einstein. Le paragraphe 10 traite de la dynamique de l'électron : "Dynamik des (langsam beschleunigten) Elektrons". Dans celui-ci, Einstein déduit de nouvelles relations entre les masses longitudinale et transverse de l'électron en mouvement et sa vitesse [91].

Ces relations sont très similaires à celles déduites de la théorie de l'électron de Lorentz, à ceci près que la masse transverse calculée par Einstein n'est pas identique à celle de Lorentz. Il semble ainsi qu'il existe quatre formules différentes exprimant la variation de la masse transverse de l'électron en fonction de sa vitesse, celles d'Abraham, de Lorentz, de Bucherer-Langevin et d'Einstein. Kaufmann est le premier à observer que, du point de vue de l'expression de la masse transverse, les prédictions d'Einstein et de Lorentz sont en fait équivalentes [92]. Il écrit le 30 novembre 1905 :

> "En plus [des théories d'Abraham, de Lorentz et de Bucherer], il faut mentionner une publication récente de M. A. Einstein sur la théorie de l'électrodynamique qui conduit à des résultats formellement identiques à ceux de la théorie de Lorentz." [93]

Comme nous l'avons fait précédemment pour les théories d'Abraham et de Lorentz, nous proposons de rappeler brièvement comment Einstein arrive aux relations entre la masse et la vitesse. Ceci nous permettra de mettre en évidence son raisonnement. Dans le paragraphe sur "l'électrodynamique de l'électron", Einstein considère une "particule ponctuelle (appelée par la suite électron) dotée d'une charge électrique" [94]. Initialement, l'électron est au repos dans un référentiel qu'Einstein note K.

91. Einstein (1905, p. 919).
92. Selon Miller, Kaufmann est le premier à citer l'article d'Einstein dans une note note datée du 30 novembre 1905 (Kaufmann, 1905). Il propose à la fin de la même année une analyse plus détaillée de l'article d'Einstein (Kaufmann, 1906).
93. Cité par Miller (1981, p. 213) : "In addition [to the theories of Abraham, Lorentz and Bucherer] there is to be mentioned a recent publication by Mr. A. Einstein on the theory of electrodynamics which leads to results which are formally identical with those of Lorentz's theory."
94. Pour la traduction en français de l'article "Zur Elektrodynamik . . . ", nous renvoyons le lecteur à Balibar (2002, p. 251-298).

Les équations du mouvement, "dans l'intervalle élémentaire de temps immédiatement ultérieur" sont données par [95] :

$$\mu_0 \frac{\mathrm{d}^2\vec{x}}{\mathrm{d}t^2} = e\vec{E}.$$

L'électron est alors en mouvement à la vitesse v. Einstein cherche alors la loi du mouvement de l'électron à la vitesse v. Dans un référentiel k en mouvement à la même vitesse $\vec{v} = v\vec{u_x}$ par rapport à K, l'électron est au repos. Le "principe de relativité" [96] implique alors que, "dans le temps qui suit immédiatement", le mouvement dans le référentiel k est décrit par [97] :

$$\mu_0 \frac{\mathrm{d}^2\vec{x'}}{\mathrm{d}t'^2} = e\vec{E'}. \tag{1.55}$$

Dans les paragraphes 3 et 6, Einstein a montré que les relations entre $\vec{x'}$, t' et $\vec{x}$, t d'une part, et entre $\vec{E'}$ et $\vec{E}$ sont données par :

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(x - vt) \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right). \end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned} E'_x &= E_x \\ E'_y &= \gamma\left(E_y - \frac{v}{c}B_z\right) \\ E'_z &= \gamma\left(E_z + \frac{v}{c}B_y\right). \end{aligned}$$

Il transforme alors l'équation 1.55 en [98] :

95. Einstein travaille par composante et non de façon vectorielle. Pour simplifier la lecture, nous utilisons la notation vectorielle, et nous conservons les notations précédemment introduites.

96. Einstein (1905, p. 918) : "Relativitätsprinzip".

97. Les grandeurs dans k sont primées.

98. Remarquons que, pour Einstein, l'expression de la force de Lorentz est déduite du principe de relativité appliqué aux équations du champ électromagnétique. Voir Miller (1981, p. 309), Einstein (1905, p. 910) et Balibar (2002, p. 281).

$$\mu_0 \gamma^3 \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} = eE'_x \tag{1.56}$$

$$\mu_0 \gamma^2 \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} = eE'_y \tag{1.57}$$

$$\mu_0 \gamma^2 \frac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}t^2} = eE'_z. \tag{1.58}$$

> "Adoptant alors le point de vue usuel, nous nous demandons quelles sont les masses "longitudinale" et "transversale" de l'électron." [99]

Pour ce faire, Einstein remarque que les composantes eE'_x, eE'_y et eE'_z sont celles de la force s'exerçant sur l'électron observé "depuis un système se déplaçant à ce moment là avec l'électron". Autrement dit, ce sont les composantes de la force exercée sur l'électron au repos dans k. Il choisit alors de préserver la forme de la seconde loi de Newton en définissant cette force comme égale au produit de la masse par l'accélération mesuré dans le système K, si bien qu'il obtient :

$$\mu_1 = \mu_0 \gamma^3 \tag{1.59}$$

$$\mu = \mu_0 \gamma^2. \tag{1.60}$$

La relation entre la masse transversale et la vitesse est similaire à celle de Lorentz, mais en diffère d'un facteur γ [100]. Nous appellerons cette 'relation "formule d'Einstein". Explicitons à quoi tient cette différence.

Pour Einstein, la masse longitudinale (resp. transversale) est le coefficient de l'accélération tangentielle (resp. normale) dans la loi de Newton exprimée comme $\vec{F} = m\vec{a}$. Pour Abraham comme pour Lorentz, cette loi s'exprime en fonction de la quantité de mouvement $\vec{G}$ comme $\frac{d\vec{G}}{dt} = \vec{F}$. Einstein est d'ailleurs conscient que la définition qu'il propose pour la force n'est pas la seule possible :

> "Naturellement, avec une autre définition de la force et de l'accélération, on obtiendrait d'autres valeurs pour les masses ; il apparaît donc qu'il faut procéder avec la plus grande prudence lorsque l'on compare entre elles les *différentes théories du mouvement de l'électron*." [101]

Quelles sont les "différentes théories du mouvement de l'électron" auxquelles Ein-

99. Einstein (1905, p. 918-919), et pour la traductionBalibar (2002, p. 294).
100. Voir la relation de Lorentz Eq. 1.48.
101. Einstein (1905, p. 919 ; souligné par nous) et Balibar (2002, p. 295).

stein fait référence ? Selon Miller [102], il est possible que ce soit à celle de Bucherer. Mais il est étrange qu'Einstein ne mentionne pas la formule de Lorentz pour la masse transverse, car il est très certainement au fait de celle-ci. L'hypothèse avancée est qu'Einstein préfère éviter les conjectures "aventureuses" sur la constitution de la matière. Ceci est probable car il ne parle en effet pas de "théorie de l'électron", mais bien de "théorie du *mouvement* de l'électron".

Quoi qu'il en soit, c'est Kaufmann qui remarque le premier (dans une publication) que la différence entre les prédictions d'Einstein et de Lorentz n'est qu'apparente :

> " La théorie d'Einstein conduit à la même formule que celle de Lorentz, si l'on considère les équations du mouvement données par M. Einstein ; la définition donnée par M. Einstein de la masse pour un observateur se déplaçant avec l'électron ne correspond pas aux conditions présentées dans mes observations ; c'est pourquoi la différence entre son équation pour la masse de l'électron et celle de Lorentz n'est qu'apparente." [103].

En effet, les équations du mouvement (Eq. 1.56 à 1.58) auxquelles Kaufmann fait référence définissent la masse comme le coefficient de l'accélération lorsque la force est définie comme celle exercée sur l'électron mesurée dans le référentiel k. Or, Kaufmann mesure les champs dans le référentiel K. Il écrit donc les équations du mouvement comme :

$$\mu_0\gamma^3\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = eE_x \qquad ((1.56))$$

$$\mu_0\gamma^2\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} = e\gamma\left(E_y - \frac{v}{c}B_z\right) \qquad (1.61)$$

$$\mu_0\gamma^2\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2} = e\gamma\left(E_z + \frac{v}{c}B_y\right). \qquad (1.62)$$

Alors, les expressions pour les masses longitudinale et transversale sont données par :

102. Miller (1981, p. 311-312).
103. Kaufmann (1906, p. 530-531) : "Die Einsteinsche Theorie führt zu derselben Formel wie die Lorentzsche, wenn man sich an die von Hrn. Einstein angegebenen Bewegungsgleichungen hält ; die von hrn. Einstein gegebene etwas abweichende Definition der Masse für einen mit dem Elektron mitbewegten Beobachter entspricht nicht den bei meinen Beobachtungen vorliegenden Verhältnissen ; die Abweichung seiner Gleichung für die Masse des Elektrons von den Lorentzschen ist deshalb auch nur eine scheinbare."

$$\mu_1 = \mu_0 \gamma^3$$
$$\mu = \mu_0 \gamma.$$

Ce sont bien les relations de Lorentz (Eqs. 1.46 et 1.48). La définition "pas très avantageuse"[104] de la force proposée par Einstein en 1905 est reprise en 1906 par Max Planck[105]. Celui-ci montre qu'il est possible d'écrire les équations du mouvement (Eqs. 1.56, 1.61, 1.62) comme :

$$\vec{F} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\mu_0 \vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right). \tag{1.63}$$

Il continue en proposant une formulation lagrangienne cohérente avec cette définition de la force et identifie la quantité $\beta\mu_0\vec{v}$ comme l'impulsion d'un corps ponctuel de masse μ_0.

De sa parution en 1905 aux publications de Kaufmann et Planck quelques mois plus tard, la "théorie du mouvement de l'électron" proposée par Einstein est, du point de vue de sa formulation mathématique, identifiée à celle de Lorentz. Cette formule pour la masse transverse (Eq. 1.48) sera dorénavant connue sous le nom de "formule de Lorentz-Einstein".

1.5.2 Théorie de Lorentz, théorie d'Einstein ou théorie de Lorentz-Einstein ?

Assimilation entre les théories de Lorentz et d'Einstein Comme le remarquent les physiciens du début du XX^{e}siècle, les démarches respectives de Lorentz et Einstein sont différentes. Le premier fait des hypothèses sur la constitution de la matière et des électrons afin de construire une théorie électromagnétique compatible avec les faits expérimentaux, qui laissent supposer que le mouvement de la Terre par rapport à l'éther immobile n'est pas détectable. Le second postule un principe, le principe de relativité, et un invariant, la vitesse de la lumière dans le vide. À partir de ces deux postulats, Einstein retrouve les résultats obtenus par Lorentz.

Pour Kaufmann, Einstein améliore d'un point de vue épistémologique la théorie

104. Balibar (2002, p. 295).
105. Voir Planck (1906a) et Planck (1908).

de l'électron de Lorentz [106] :

> "Il est ainsi remarquable qu'à partir d'hypothèses tout à fait différentes, M. Einstein soit récemment parvenu à un résultat qui correspond à celui de Lorentz dans ses conclusions accessibles à l'observation, et pour lequel les difficultés d'ordre épistémologique juste mentionnées sont évitées." [107]

Kaufmann prend alors des précautions et distingue la "théorie de Lorentz" et la "théorie d'Einstein" [108]. Mais, dans le même article, il parle également de "l'hypothèse fondamentale de Lorentz-Einstein" ("Lorentz-Einsteinschen Grundannahme" [109]). Aussi différentes soient-elles sur le plan de l'organisation conceptuelle, les théories de Lorentz et Einstein ont les mêmes conséquences observables.

Cette contraction — Lorentz-Einstein — a fait l'objet de nombreux débats chez les philosophes et historiens des sciences, dont les principaux enjeux sont de comprendre d'une part si, et en quoi, d'un point de vue épistémologique, la théorie d'Einstein est "supérieure" à celle de Lorentz, et d'autre part si elles sont équivalentes dans leurs prédictions empiriques [110].

Nous pensons avec O. Darrigol que ces débats, qui ont leur importance dans le cadre de la philosophie des sciences, n'étaient pas au centre des discussions dans le contexte historique de l'époque [111]. Miller semble partager cette interprétation :

> "La différence entre les théories d'Einstein et de Lorentz ne pouvait pas être appréciée par la plupart de ceux concernés par la théorie de la relativité (dont

106. Cette interprétation est donnée par Miller (1981, p. 215). Nous y souscrivons, ainsi que le suggère la citation suivante de Kaufmann.

107. Kaufmann (1906, p. 491-492) : "Es ist nun bemerkenswert, daß von ganz anderen Vorraussetzungen ausgehend Hr. Einstein jüngst zu Resultaten gelangt, die in ihren *der Beobachtung zugänglichen* Folgerungen mit den Lorentzschen übereinstimmen, bei denen aber die eben erwähnten Schwierigkeiten erkenntnistheoretischer Art vermieden sind." Les "difficultés d'ordre épistémologiques" évoquées par Kaufmann concernent la contraction de Lorentz-Fitzgerald et l'impossibilité de mesurer la longueur absolue d'un objet. Ces difficultés sont écartées dans la théorie d'Einstein pour laquelle il n'y a plus de longueur absolue. Celui-ci place en effet le "principe du mouvement relatif au sommet de toute la physique" ("das Prinzip der Relativbewegung für die Gesamte Physik an die Spitze"), ce qui modifie la "cinématique du corps rigide" ("die Kinematik des starren Körpers"). Voir la discussion originale dans Kaufmann (1906, p. 490-491) et son interprétation par Miller (1981, p. 214-215).

108. Kaufmann (1906, p. 534).

109. Kaufmann (1906, p. 495).

110. Pour un rappel concis de ces débats, voir Abiko (2003, particulièrement p. 194-200) et Janssen (2002). Concernant la première question, les philosophes et historiens semblent s'accorder sur le fait que la théorie d'Einstein repose sur des postulats simples et possède une validité étendue. Quant à la seconde question, la réponse est oui si l'on considère la théorie de Lorentz telle qu'il la développe après 1905.

111. Nous remercions O. Darrigol pour l'échange informel que nous avons eu sur le sujet et renvoyons à son travail : Darrigol (1996).

> Planck) avant que le concept de l'éther ne commence rapidement à disparaître (c. 1910)." [112]

Que se passe-t-il par la suite ? D'après S.G. Brush,

> " [...] la relativité était largement discutée parmi les principaux physiciens en Allemagne peu après la publication des articles d'Einstein en 1905. En 1911, elle était considérée comme si bien établie qu'Arnold Sommerfeld, qui avait prévu de parler de la relativité au congrès de Solvay cette année là, a décidé de s'attaquer à la place aux questions plus controversées sur les quanta et la nature de la lumière." [113]

Il ressort de ces interprétations que ce n'est qu'à partir des années 1910-1911 que la théorie de la relativité est stabilisée. Miller va plus loin et affirme qu'en 1911, "la théorie d'Einstein s'est démarquée de celle de Lorentz" [114]. Pourtant, elle est encore loin d'être unanimement comprise ou acceptée, même par des physiciens de premier plan comme Planck, Lorentz ou Abraham. Ainsi, par "si bien établie", Brush veut — peut-être — dire qu'elle avait acquis, en 1911, un cadre formel cohérent différent de celui de la théorie électromagnétique de Lorentz. Il aurait — peut-être — dû ajouter "si bien établie" parmi ses partisans qui la comprennent. En effet, les conséquences sur la nature du temps et de l'espace dans la théorie d'Einstein laissent beaucoup d'autres perplexes [115].

Quoi qu'il en soit, nous comprenons mieux pourquoi, en 1906, Kaufmann qui a lu avec attention l'article fondateur d'Einstein utilise aussi bien les expressions "théorie de Lorentz", "théorie d'Einstein" et "hypothèse fondamentale de Lorentz-Einstein". Il est conscient de la différence d'approche, reconnaît les avantages de cette vision nouvelle, mais montre que, pour Lorentz comme pour Einstein, les masses transverses et longitudinales s'expriment par les mêmes formules.

112. Miller (1973, p. 308).
113. Brush (1999, p. 192) : "[...] relativity was widely discussed among leading physicists in Germany soon after the appearance of Einstein's 1905 papers. By 1911 it was considered so well established that Arnold Sommerfeld, who had planned to speak about relativity at the Solvay Congress that year, decided to address instead the more controversial questions about quanta and the nature of light." A propos de Sommerfeld, Miller (1981, p. 239) nous dit qu'il choisit, pour les même raisons que celles rapportées par Brush, de ne pas parler de la relativité au 83^{e} *Naturforscherversammlung* de Karlsruhe en septembre 1911.
114. Miller (1981, p. 239) : "[...] by 1911 [...] Einstein's theory had been demarcated from Lorentz's."
115. Miller (1981, chapitre 7).

Changement de point de vue dans les années 1910 Cinq ans plus tard, en 1911, la théorie de la relativité se présente sous un cadre formel plus abouti à travers le concept d'espace-temps et son développement par Minkowski au cours des années 1907-1908. Il semble toutefois qu'elle n'acquière une réelle autonomie vis à vis de la théorie électromagnétique de Lorentz qu'au cours de la décennie 1910. Ainsi, dans la seconde édition de *The theory of electrons* en 1915, Lorentz maintient l'affirmation écrite dans sa première édition en 1906 :

> "Einstein postule simplement ce que nous avons déduit, avec difficulté et de façon pas entièrement satisfaisante, des équations fondamentales du champ électromagnétique." [116]

En 1922, il a changé de point de vue. S'exprimant au sujet de la variation de l'inertie avec la vitesse et de ses vérifications expérimentales, il abandonne l'interprétation selon laquelle leur conclusion concerne la structure de l'électron. La formule de Lorentz-Einstein est une "conséquence générale du principe de relativité". Sa vérification "ne nous dit rien sur la nature de la masse ou sur la structure de l'électron" [117].

La théorie de la relativité est finalement comprise comme fondamentalement différente de la théorie de Lorentz. La première ne fait pas d'hypothèse sur la structure de l'électron. Ses prédictions théoriques sur la variation de l'inertie avec la vitesse sont valables pour tous les corps. Ce sont des relations "cinématiques" [118] déduites du principe de relativité. La seconde était fondée sur un modèle d'électron dans lequel la masse apparaissait comme une conséquence de l'auto-interaction avec son champ électromagnétique.

Conclusion Nous avons posé la question de savoir si la théorie de la relativité proposait une conception différente de l'inertie de celle de Lorentz et d'Abraham.

Dans le cadre de la théorie d'Einstein, l'inertie des corps est une propriété dont on ne cherche pas, *a priori*, à élucider la nature. À ce titre, la théorie de la relativité ne propose pas de conception *différente* de l'inertie. Elle laisse ce point en suspens. Il faut néanmoins attendre le travail de von Laue en 1911, aboutissement des travaux de Planck et Minkowski, pour établir définitivement que les relations 1.59 et 1.60 sont

116. Cité par Janssen (2009, p. 38), d'après Lorentz (1915, p. 229-230) : "Einstein simply postulates what we have deduced, with some difficulty and not altogether satisfactorily, from the fundamental equations of the electromagnetic field."
117. Cité par Janssen (2009, p. 38) d'après Lorentz (1927, p. 125).
118. Voir Pais (1982, p. 159), Janssen et Mecklenburg (2007) et Janssen (2009, §. 3).

valables "pour tout système fermé décrit par les lois invariantes par transformation de Lorentz"[119].

119. Janssen (2009, p. 36) : "[These relations] give the velocity dependence of the mass of any closed system described by Lorentz-invariant laws."

1.6 Mesurer la variation de l'inertie de l'électron avec sa vitesse : une épopée qui n'aboutit pas ?

1.6.1 Pourquoi la question de l'inertie de l'électron est-elle si importante dans les années 1900-1910 ?

1.6.1.1 Les successeurs de Kaufmann

L'inertie de l'électron dépend-elle de sa vitesse ? Si oui, quelle formule théorique peut rendre le mieux compte de cette variation ?

La réponse (affirmative) à la première question est apportée dès 1902 par Kaufmann et n'est pas démentie par la suite. La seconde question en revanche va occuper les expérimentateurs bien après les années 1910.

Suite aux critiques des conclusions de Kaufmann en 1906 [120], de nouvelles expériences sont demandées. Bucherer en 1908, Erich Hupka d'une part, Guye et Ratnowsky de l'autre en 1909, Charles A. Proctor en 1910, Clemens Schaefer et Günther Neumann en 1914, Guye et Lanvanchy d'une part, Lloyd T. Jones de l'autre en 1916 vont poursuivre ces recherches, pendant dix ans après les dernières conclusions de Kaufmann. Il faudra attendre près de vingt ans pour que d'autres recherches similaires soient à nouveau menées [121].

S'il apparaît à première vue légitime pour des expérimentateurs de chercher à améliorer la précision discutable et discutée de recherches antérieures, il convient pour l'historien de se demander à quelle(s) question(s) théorique(s) s'attaquent les expériences d'une part, et d'autre part quelles améliorations/modifications sont effectivement apportées par les successeurs.

120. Rappelons que Starke a réalisé des expériences sur les rayons cathodiques et fait donc figure, comme Kaufmann, de précurseur, même s'il ne formule pas de conclusion définitive, du fait d'un dispositif peu fiable. Voir Starke (1903b).

121. Nous ne parlons ici que des recherches dans le cadre de la dynamique de l'électron. D'autres expériences sont en effet menées à partir de 1913 pour déterminer la variation de l'inertie avec la vitesse, mais ce sont des expériences de spectroscopie en lien avec le traitement relativiste de l'atome de Bohr par Sommerfeld. Elles pourraient être qualifiées de mesures indirectes, au contraire des mesures directes effectuées sur les rayons cathodiques ou β ; voir Faragó et Jánossy (1957). Dans les travaux effectués par Hermann Starke et M. Nacken (1934-1935) (Starke et Nacken, 1934), (Nacken, 1935), puis Heinrich Lahaye (1939)(Lahaye, 1939), les mesures sont effectuées sur des rayons cathodiques accélérés sous des différences de potentiel que ne pouvaient atteindre les machines électrostatiques disponibles dans les années 1910, jusqu'à 200 kV.

1.6.1.2 La variation de l'inertie de l'électron avec la vitesse : une question au cœur de plusieurs problématiques théoriques

Quand Kaufmann démarre ses expériences en 1901, son but est de montrer si la masse de l'électron peut être considérée comme entièrement d'origine électromagnétique. Jusque 1904, il s'agit de montrer que la prédiction théorique d'Abraham sur la masse transverse de l'électron (Eq. 1.26) est vérifiée par les mesures. Kaufmann affirme que tel est le cas. Mais, à partir de 1904, la théorie de l'électron rigide d'Abraham est concurrencée par deux autres conceptions de l'électron : l'électron déformable à volume constant de Bucherer, et l'électron déformable à volume variable de Lorentz. L'expérience de Kaufmann se voit ainsi appelée à trancher entre ces trois théories de l'électron qui reposent chacune sur un *modèle* différent de cette particule.

La situation évolue à nouveau en 1905 avec la publication d'Einstein, que Kaufmann intègre à son analyse dès la même année. Il y a toujours différents modèles d'électron, mais ils sont liés à deux conceptions qui s'opposent. L'électron d'Abraham et de Bucherer sont purement électromagnétiques mais ne satisfont pas au principe de relativité, alors que l'électron de Lorentz n'est pas purement électromagnétique mais est en accord avec ce principe. La théorie d'Einstein ne prédit rien quant à un modèle d'électron. Elle postule le principe de relativité et aboutit aux mêmes formules que celles déduites de la théorie de Lorentz.

Un premier changement a eu lieu dans la formulation de la question de la variation de l'inertie de l'électron. Avant 1904, il s'agit de montrer que cette inertie est entièrement électromagnétique. Les publications de Kaufmann s'intitulent *(Sur la) la masse électromagnétique de l'électron* [122]. Après 1904, il s'agit de choisir entre plusieurs modèles d'électron et deux conceptions de ce qui doit constituer le fondement de la physique.

Pour Kaufmann, la question importante a trait au choix d'un modèle d'électron. Cela peut se comprendre car il est l'un des partisans de l'élaboration d'une conception électromagnétique globale. Ses publications de 1905 et 1906 s'intitulent *Sur la constitution de l'électron* [123]. Il note cependant dans le cœur de ses articles l'importance de ses résultats quant à la validité du principe de relativité. Il écrit en 1905 :

"Les résultats présentés vont catégoriquement à l'encontre de la validité de l'hy-

122. Kaufmann (1902c), Kaufmann (1902a), Kaufmann (1903).
123. Kaufmann (1905), Kaufmann (1906).

> pothèse fondamentale de Lorentz et par conséquent aussi de celle d'Einstein. Si l'on juge cette hypothèse ainsi réfutée, alors la recherche d'une fondation de toute la physique y compris l'électrodynamique et l'optique, sur le principe du mouvement relatif, doit être provisoirement considérée comme ayant échoué." [124]

Lors de la discussion qui suit l'intervention de Planck au 78^{e} *Naturforscherversammlung*, le 19 septembre 1906 [125], celui-ci pose le problème comme ceci :

> "Abraham a raison quand il dit que l'avantage essentiel de la théorie [de l'électron rigide] serait qu'elle serait une théorie purement électrique. Si cela était confirmée, cela serait certainement très beau, mais en attendant, ce n'est qu'un postulat. La théorie de Lorentz-Einstein prend également comme fondement un postulat, selon lequel aucune translation absolue n'est observable. Il semble que les deux postulats soient incompatibles, et il s'agit alors de savoir à quel postulat donner l'avantage. Celui de Lorentz m'est à vrai dire plus sympathique." [126]

Il s'agit effectivement pour Planck d'un choix entre deux "postulats" irréconciliables : la conception électromagnétique globale ou le principe de relativité. Pour trancher, il en appelle à de nouvelles expériences.

Ainsi que nous l'avons rappelé au paragraphe 1.5.2, ce n'est qu'au cours des années 1910 que la théorie de la relativité se démarque clairement de la théorie de l'électron de Lorentz, et que la variation de l'inertie avec la vitesse est comprise comme indépendante d'un quelconque modèle d'électron. Ceci suggère que la formulation par Planck du problème en terme de choix de postulat doit pouvoir être retenue comme étant la question à laquelle les expériences sur la variation de l'inertie doivent répondre.

124. Kaufmann (1905, p. 956) : "Die vorstehenden Ergebnisse sprechen entschieden gegen die Richtigkeit der Lorentzschen und somit auch der Einsteinschen Grundannahme. Erachtet man diese Grundannahme als hierdurch widerlegt, so würde der Versuch, die ganze Physik, einschließlich der Elektrodynamik und der Optik auf das Prinzip der Relativbewegung zu gründen, einstweilen als mißglückt zu bezeichnen sein."

125. Miller (1981, p. 220).

126. Planck (1906b, p. 761) :"Abraham hat recht, wenn er sagt, der wesentliche Vorzug der Kugeltheorie würde sein, daß es eine rein elektrische Theorie wäre. Wenn dies durchfürchbar wäre, wäre das wohl sehr schön, vorläufig ist es nur ein Postulat. Der Lorentz-Einsteinsche Theorie liegt auch ein Postulat zugrunde, nämlich, daß keine absolute Translation nachzuweisen ist. Beide Postulate lassen sich, wie es scheint, nicht vereinigen, und nun kommt es darauf an, welchem Postulat man den Vorzug gibt. Mir ist das Lorentzsche eigentlich sympatischer."

1.6.2 Expériences sur la variation de l'inertie des électrons entre 1906 et 1916

1.6.2.1 L'expérience de Kaufmann (1906) et ses réceptions

L'analyse de ses mesures par Kaufmann En ce qui concerne les expériences destinées à mesurer la variation de l'inertie de l'électron avec sa vitesse, l'intérêt principal à utiliser le rayonnement β est que les électrons émis peuvent atteindre des vitesses très proches de celle de la lumière, ce qui implique une augmentation notable de la masse.

> "[...] les rayons β ont une vitesse considérablement plus grande que les rayons cathodiques. On pouvait donc espérer que la dépendance de la masse à la vitesse se montrerait nettement pour les rayons β." [127]

Une autre caractéristique du rayonnement β est que les électrons sont émis dans toutes les directions, et selon un spectre de vitesse continu et assez large. Kaufmann, le premier à utiliser ce type d'émission pour montrer la variation de l'inertie avec la vitesse, met à profit cette caractéristique.

Dans son dispositif [128], les électrons sont soumis de façon simultanée à un champ électrique et à un champ magnétique parallèles. Les déviations respectives se font donc dans deux directions orthogonales. L'enregistrement des déviations se fait sur une plaque photographique. L'inhomogénéité du rayonnement par rapport à la vitesse a pour effet de produire des déviations électrique et magnétique qui dessinent une courbe sur la plaque photographique. Alors, chaque point de cette courbe correspond à une valeur de la vitesse, et donc de la masse de l'électron.

Toute la difficulté pour Kaufmann consiste ensuite à interpréter les déviations en fonction des champs et de la géométrie de son dispositif. C'est l'une des critiques qui sera formulée par Planck en septembre 1906, lorsqu'il constate que l'une des mesures conduit à une valeur de β supérieure à l'unité.

> " Par conséquent, il ne reste que l'hypothèse selon laquelle il y a encore dans l'interprétation théorique des grandeurs mesurées une lacune essentielle qui doit en premier lieu être comblée avant que les mesures ne puissent être utilisées pour

127. Kaufmann (1906, p. 488) : "[...] die β-Strahlen eine bedeutend höhere Geschwindigkeit besäßen, als die Kathodenstrahlen. Dann war aber auch zu hoffen, daß für die β-Strahlen sich die Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit deutlich zeigen würde."

128. Nous ne procédons ici qu'à une description très sommaire du dispositif et de l'analyse de l'expérience de Kaufmann. Celle-ci a été étudiée dans le détail par Cushing (1981), Miller (1981, p. 44-51 ; p. 57-62 ; p. 215-219) et Hon (1995, p. 175-194).

> trancher définitivement entre la théorie [de l'électron déformable] et la théorie [de la relativité]." [129]

L'analyse que fait Kaufmann repose sur la courbe enregistrée sur la plaque photographique. Il analyse cette courbe selon la méthode proposée par Runge trois ans plus tôt. Il détermine d'abord ce qu'il appelle les "constantes de la courbe" [130] par la méthode des moindres carrés. Il compare ensuite ces constantes à leur valeur qu'il peut calculer en fonction des champs et de la charge spécifique de l'électron. Cette comparaison ne permet pas de rejeter l'une ou l'autre des théories :

> "[...] chacune des trois théories décrit bien la forme relative de la courbe." [131]

Il procède ensuite à l'élimination de la charge spécifique de l'électron $\frac{\epsilon}{\mu_0}$ [132], dont la valeur est encore sujette à caution, par la multiplication des constantes de la courbe calculées pour les théories d'Abraham et de Bucherer. Du fait de sa forme particulière, la constante dans la théorie de Lorentz est indépendante de la charge spécifique. La comparaison entre ces grandeurs et leur valeur déduite des champs électrique et magnétique est très défavorable à Lorentz : $-10,4\%$ contre $-3,5\%$ et $-2,8\%$ pour Abraham et Bucherer.

Sa troisième comparaison consiste à déduire de ses mesures la valeur de la charge spécifique à la limite $v \to 0$. Il la compare ensuite à la valeur mesurée par Simon en 1899 sur des rayons cathodiques. À nouveau, la théorie de Lorentz semble rejetée avec un écart de $-11,4\%$ contre $-2,9\%$ et $-3,7\%$ pour Abraham et Bucherer.

Enfin, il procède à une ultime analyse dans laquelle il compare la courbe des déviations telle qu'il l'a enregistrée à la courbe déduite des constantes qu'il a calculées. La courbe de Lorentz présente la plus grande déviation.

Critiques de Planck et Bestelmeyer Les premières critiques formulées à l'encontre des conclusions de Kaufmann le sont en mars 1906 par Planck [133]. Mais il ne

129. Planck (1906a, p.758) : "Somit scheint nichts übrig zu bleiben als die Annahme, daß in der theoretischen Deutung der gemessenen Größen noch irgen eine wesentliche Lücke enthalten ist, welche erst ausgefüllt werden muß, ehe die Messungen sich zu einer definitiven Entscheidung zwischen der Kugeltheorie und der Relativtheorie verwerten lassen werden."

130. Kaufmann (1906, p. 530) : "Kurvenkonstanten".

131. Kaufmann (1906, p. 532).

132. La charge spécifique doit être entendue comme le rapport de la charge de l'électron ϵ, exprimée dans le système d'unité (CGS) de Gauss, à sa masse exprimée, de fait, en grammes. Autrement dit, $\frac{\epsilon}{\mu_0} = \frac{e}{c.\mu_0}$, avec c en $cm.s^{-1}$. Ainsi, $\frac{e}{\mu_0} \approx 1,7 \cdot 10^{11}\ USI$ et $\frac{\epsilon}{\mu_0} \approx 1,7 \cdot 10^{7}\ CGS$. Pour un rappel des différents systèmes d'unité utilisés en électromagnétisme, voir Jackson (2001, p. 810-819).

133. Miller (1981, p. 220).

peut que constater la complexité de l'analyse de Kaufmann sans remettre en question un quelconque point de son travail. Il argumente cependant en faveur du principe de relativité et de son application tant en mécanique qu'en électromagnétisme. Six mois plus tard, sa critique est plus acérée, mais les réponses de Kaufmann ne le sont pas moins. Planck ne parvient pas à le contrer. Il se trouve à nouveau dans une bataille entre principe de relativité et conception électromagnétique globale.

La situation change en juillet 1907 [134] après la publication d'un travail réalisé par Adolf Bestelmeyer en 1906 [135]. Il s'agit d'une mesure de la charge spécifique de rayons cathodiques émis par l'impact de rayons X sur une électrode de platine. Les électrons sont émis dans toutes les directions, dans un large spectre de vitesse. Contrairement à Kaufmann qui utilise l'inhomogénéité en vitesse, Bestelmeyer met au point un dispositif permettant de sélectionner un domaine de vitesse très réduit. Autrement dit, il met au point un filtre de vitesse.

Le filtrage repose en premier lieu sur un arrangement géométrique particulier du condensateur créant le champ électrique de déviation. Ce condensateur est allongé (6,68 cm) et l'écart entre ses plateaux est très fin (0,580 mm). En plus du champ électrique, une champ magnétique perpendiculaire est appliqué dans un sens tel que les déviations électrique et magnétique sont opposées à l'intérieur du condensateur. À l'extérieur, les électrons ne sont soumis qu'au champ magnétique.

Choisissons les axes tels que $\vec{E} = E\vec{u}_y$ et $\vec{B} = B\vec{u}_z$. L'hypothèse selon laquelle seuls les électrons se déplaçant *parallèlement* à $\vec{u}_x$ peuvent sortir du condensateur, implique que la résultante des forces s'exerçant sur les électrons *dans* le condensateur est nulle, soit :

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}\vec{G}}{\mathrm{d}t} &= -e\vec{E} - e\vec{v}\mathrm{x}\vec{B} \\ &= \vec{0} \\ \frac{v}{c} &= \frac{E}{B}. \end{aligned}$$

Ainsi, le réglage des champs permet de déterminer la vitesse des électrons dont Bestelmeyer observe la déviation magnétique sur une plaque photographique.

En conclusion, Bestelmeyer se livre à une analyse du dispositif expérimental de Kaufmann et du traitement qu'il propose de ses mesures. Il a en effet trouvé une

134. Planck (1907).
135. Bestelmeyer (1907).

valeur d'environ $1{,}72.10^7$ pour la charge spécifique, soit une différence de 8% avec la valeur utilisée par Kaufmann dans son analyse. La "formule de Lorentz" [136] n'est peut-être alors pas vraiment remise en question par les mesures de Kaufmann. Pour Bestelmeyer, la détermination des constantes de la courbe n'est pas non plus une bonne façon de procéder car même une "assez grande" ["ziemlich weit"] variation de leurs valeurs ne mène pas à un "écart conséquent" ["unzulässige Abweichung"] entre la courbe calculée et la courbe observée [137]. Le traitement des mesures tel que réalisé par Kaufmann est donc sujet à caution.

Bestelmeyer compare ensuite sa méthode expérimentale à celle de Kaufmann. Il affirme que l'impact des rayons cathodiques sur la plaque photographique est plus intense que celui des rayons β. Ainsi, la durée d'exposition nécessaire à l'obtention de l'image des déviations est réduite. Elle est d'environ 48 heures avec le dispositif de Kaufmann contre 90 minutes chez Bestelmeyer. Il est donc plus facile pour lui de maintenir des champs électrique et magnétique constants. De plus, la géométrie de son condensateur permet d'obtenir un champ électrique plus uniforme et de réduire le risque d'étincelles. Les plateaux sont en effet très rapprochés, ce qui lui permet de travailler avec des tensions dix fois plus petites que celles de Kaufmann.

Citons enfin une remarque importante de Bestelmeyer :

> "Pour la détermination de la fonction de la vitesse $\Phi(\beta)$ dans l'équation $\mu = \mu_0 \cdot \Phi(\beta)$, le protocole offre le grand avantage de pouvoir choisir les champs de telle sorte que les trajectoires des électrons soient les mêmes pour toutes les vitesses, si bien que l'on peut non seulement choisir la déviation la plus favorable pour toutes les vitesses, mais encore éliminer du même coup plusieurs sources d'erreur. L'expression de $\Phi(\beta)$ ne dépend que de la déviation sur la plaque photographique et des valeurs mesurées de la tension et du courant du condensateur et du solénoïde. Les dimensions du dispositif n'interviennent que dans la détermination de β, de telle sorte que la méthode rend également possible des mesures exactes de $(\Phi(\beta) - 1)$ pour des vitesses petites." [138]

136. Bestelmeyer (1907, p. 443).
137. Bestelmeyer (1907, p. 443).
138. Bestelmeyer (1907, p. 446) : "Für die Bestimmung der Geschwindigkeitsfunktion $\Phi(\beta)$ in der Gleichung $\mu = \mu_0 \cdot \Phi(\beta)$ bietet der Umstand einen großen Vorteil, daß man die Felder so wählen kann, daß die Elektronenbahnen bei allen Geschwindigkeiten dieselben sind, wodurch man nicht nur für alle Geschwindigkeiten eine möglichst günstige Größe der Ablenkung wählen kann, sondern auch eine Reihe von Fehlerquellen ohne weiteres eliminiert wird. In die Berechnung von $\Phi(\beta)$ gehen nur ein der Abstand der Spaltbilder auf der photographischen Platte und die Spannungs- bez. Strommessung von Kondensator und Spule. Die Apparatsdimensionen gehen nur für die Berechnung von β ein, wodurch die Methode auch bei kleinen Geschwindigkeiten noch exakte Messungen der Größe $(\Phi(\beta) - 1)$ ermöglicht."

Quelque soit la vitesse des électrons, la trajectoire suivie est toujours la même, ce qui lui permet de rendre la fonction $\Phi(\beta)$ dépendante des seules mesures de la déviation et des tensions et intensités sources de cette déviation, et non des dimensions du dispositif.

Les remarques de Bestelmeyer et les recherches menées par Geiger et Stark sur l'ionisation des gaz par les rayons β conduisent Planck à reprendre sa critique de 1906, et plus particulièrement son observation que l'un des points calculés par Kaufmann conduisait à une valeur de β supérieure à 1 [139]. Guidé par l'argumentation de Bestelmeyer au sujet de la géométrie du condensateur et du risque d'étincelles entre ses plateaux, il calcule le champ électrique dans le dispositif de Kaufmann. Les valeurs qu'il déduit pour chacune des théories diffèrent de la valeur supposée constante mesurée par Kaufmann. Il montre également que le champ électrique n'est en fait pas constant. L'interprétation proposée par Planck est une qualité insuffisante du vide dans l'appareil de Kaufmann, ce qui accroît le risque d'étincelles entre les plateaux du condensateur et pourrait expliquer les variations du champ électrique. Kaufmann réagit vigoureusement en affirmant que des variations de 8 % du champ électrique sont tout simplement impossibles dans son dispositif.

Planck et Bestelmeyer ne sont pas les seuls à réagir aux conclusions de Kaufmann. Hon [140] a étudié les réactions différentes de Lorentz, Poincaré et Einstein, au rejet global de chacune de leurs théories. Il montre comment le premier est prêt à remettre complètement en cause sa théorie de l'électron, alors que le second suggère la possibilité d'erreurs expérimentales... qu'il ne recherche pas. Il montre également qu'Einstein n'accepte tout simplement pas les conclusions de Kaufmann, et va au delà du célèbre argument "méthodologique" [141] selon lequel :

> "Les théories du mouvement de l'électron d'Abraham et Bucherer [s'accordent mieux avec les données de Kaufmann] que la théorie de la relativité. À mon avis, les deux ont une probabilité plutôt faible[...]" [142]

Einstein remarque en effet une déviation systématique entre les données de Kaufmann et la théorie de la relativité. Il en déduit la possibilité d'une erreur systématique d'origine encore inconnue.

139. Miller (1981, p. 322) et Goldberg (1976, p. 132).
140. Hon (1995).
141. Hon (1995, p. 209).
142. Einstein cité par Miller (1981, p. 322) : "The theories of the electrons motion of Abraham and Bucherer [agree better with Kaufmann's data] than the relativity theory. In my opinion, both theories have a rather small probability."

Une critique est également formulée à l'encontre des conclusions de Kaufmann par G.N. Lewis concerne la taille et la clarté des clichés sur lesquels les mesures sont effectuées [143].

1.6.2.2 Âpreté des débats autour des expériences sur la variation de l'inertie de l'électron avec la vitesse : les échanges Bucherer-Bestelmeyer (1908-1910) et Hupka-Heil (1909-1910)

Expérience de Bucherer Bucherer est le premier à publier d'autres résultats expérimentaux sur la variation de l'inertie des électrons avec leur vitesse. Le 22 septembre 1908 [144], lors du 80^e *Naturforscherversammlung*, il affirme ainsi avoir vérifié expérimentalement la "théorie de Lorentz-Einstein". Son dispositif s'inspire en partie de celui de Bestelmeyer, mais il travaille avec des rayons β. Les champs électrique et magnétiques sont orthogonaux, il procède à l'enregistrement photographiques des déviations, et il adapte le principe du filtre de vitesse de la façon suivante.

Le condensateur utilisé dans le dispositif de Bucherer est constitué de deux disques de 4 *cm* de diamètre, espacés de 0,25 *mm*, lesquels sont placés dans une enceinte cylindrique de 8 *cm* de diamètre. Celle-ci est placée au centre d'un long solénoïde. La surface intérieure de l'enceinte cylindrique est recouverte d'un film photographique. Les électrons qui parviennent à sortir du condensateur sont, comme pour Bestelmeyer, ceux pour lesquels la force électrique est compensée par la force magnétique. Mais, dans le dispositif de Bucherer, ces électrons peuvent sortir dans toutes les directions contenues dans le plan perpendiculaire au champ magnétique. Ainsi, la relation de compensation est donnée par :

$$\frac{v}{c} = \frac{E}{B \cdot \sin\theta}, \tag{1.64}$$

où θ est l'angle entre la vitesse des électrons à l'intérieur du condensateur et le champ magnétique. Alors, Bucherer observe l'impact des rayons déviés sur un film photographique situé sur la surface intérieure de l'enceinte cylindrique.

Sa méthode d'analyse repose ensuite sur le calcul du rapport $\frac{\epsilon}{\mu_0}$. La théorie correcte est celle qui donne une valeur constante de ce rapport. Il conclut au rejet de la théorie d'Abraham et en faveur de la "théorie de Lorentz-Einstein" et du "principe de relativité" [145].

143. Hon (1995, p. 182).
144. Bucherer (1908)
145. Bucherer (1908, p. 699) : " Dieses Ergebnis ist die Bestätigung des Relativitätsprinzips."

Dans la discussion qui suit la communication de Bucherer, Bestelmeyer s'interroge sur le filtre de vitesse et l'impact des rayons "non-compensés" sur la précision des mesures. La réponse de Bucherer ne se fait pas attendre. Dans un article plus détaillé [146], il revient sur deux effets qu'il n'avait initialement pas présentés : les effets de bord pour le condensateur, et la présence de ces rayons non-compensés.

Il montre tout d'abord que la prise en compte des effets de bord a pour conséquence de modifier les valeurs de $\frac{\epsilon}{\mu_0}$ sans pour autant modifier sa conclusion. Ensuite, il affirme que la présence des rayons non-compensés, due à l'espace non-nul entre les disques du condensateur, n'affecte pas ses conclusions de plus de 0,5%.

Les conclusions de Bucherer sont accueillies avec enthousiasme par *presque* tous. Lors de la discussion qui suit la présentation de Bucherer, Minkowski exprime sa joie de voir confirmée la "théorie de Lorentz" [147]. Poincaré et Lorentz se réjouissent également de cette conclusion. Mais, pour Planck et Bestelmeyer, d'autres expériences doivent être menées. Le premier supervise de façon informelle le travail d'Erich Hupka sur la variation de l'inertie mesurée pour les rayons cathodiques. Le second se livre à une critique sévère des conclusions de Bucherer [148].

Bestelmeyer commence sa critique en rappelant que l'on ne peut se fier à "la recherche d'un seul chercheur avec un seul appareil" pour clore une "question aussi importante" [149]. Il appelle ainsi à ce que les publications soient le plus détaillées possibles, aussi bien en ce qui concerne les mesures que les protocoles expérimentaux, et contiennent une discussion de "toutes les sources d'erreur" [150].

Pour lui, les publications de Bucherer ne répondent pas à ces deux impératifs. Il s'interroge ainsi sur la possibilité de maintenir un champ magnétique constant pendant les 60 heures que durent certaines expositions. Il regrette également que seuls 4 clichés soient exploités par Bucherer, parmi les 13 qu'il affirme avoir réalisés. Il note d'ailleurs que sur les valeurs de $\frac{\epsilon}{\mu_0}$ publiées, une seule s'écarte des autres dans le cas de la théorie d'Abraham.

"*La conclusion de M. Bucherer ne s'appuie donc que sur la connaissance de la*

146. Bucherer (1909b) et Bucherer (1909c).
147. Miller (1981, p. 331).
148. Bestelmeyer (1909).
149. Bestelmeyer (1909, p. 167) : "Es ist ziemlich fraglich, ob überhaupt die Versuche eines einzigen Forschers mit einem einzigen Apparat ausreichen können, eine so wichtige Frage [...] zu entscheiden."
150. Bestelmeyer (1909, p. 167) : "Jedenfalls aber scheint mir in einem solchen Falle einerseits eine detaillierte Angabe aller Messungen und Beobachtungsprotokolle, andererseits eine ausführliche Besprechung aller Fehlerquellen nötig."

recherche N.º 3."[151]"

Bestelmeyer continue en critiquant la façon dont Bucherer applique sa méthode des champs croisés et du filtre de vitesse. Il affirme à nouveau l'importance de travailler toujours avec la même trajectoire, afin de s'affranchir des dimensions du dispositif dans la détermination de la fonction $\Phi(\beta)$. Or Bucherer ne tient pas compte de cette remarque et perd ainsi un avantage important, sans toutefois en apporter un autre.

Enfin, il identifie deux sources d'erreur dans la mesure des déviations qui remettent selon lui en cause la conclusion de Bucherer. D'une part, les rayons non compensés élargissent d'autant plus la trace sur le film photographique que l'exposition dure jusqu'à 60 heures. D'autre part, il constate que l'inversion des champs ne crée pas une déviation symétrique.

La réponse de Bucherer ne tarde pas [152]. Selon lui, Bestelmeyer n'a pas compris ses arguments et fait de nombreuses erreurs. En particulier, il justifie ses déviations différentes par le fait que les vitesses des rayons β sont plus largement dispersées que celles des rayons cathodiques sur lesquels travaillait Bestelmeyer. Mais ce dernier n'est toujours pas satisfait, et répond point par point à Bucherer en 1910 [153].

Ainsi, suite à l'échange assez vif entre les deux expérimentateurs, et malgré les applaudissements de Lorentz, Poincaré et Minkowski, les conclusions de Bucherer ne constituent toujours pas une preuve suffisante de la formule de Lorentz-Einstein sur la masse transverse de l'électron.

Expérience de Hupka Parallèlement à l'échange qui oppose Bestelmeyer et Bucherer, deux jeunes physiciens allemands se livrent au même type de bataille que leurs aînés. Il s'agit de Hupka et Wilhelm Heil [154].

Le premier effectue un travail de thèse dans lequel il cherche à vérifier la formule de Lorentz-Einstein en observant la déviation magnétique de rayons cathodiques. L'influence de Planck sur le travail de Hupka est manifeste, comme l'attestent le choix du vocabulaire et l'arrière plan théorique [155].

151. Bestelmeyer (1909, p. 168 ; italiques originales) : "*Der Schluß des Hrn. Bucherer baut sich also fast allein auf dem Ergebnis des Versuches Nr. 3 auf.*
152. Bucherer (1909a).
153. Bestelmeyer (1910).
154. Hupka (1909), Hupka (1910a), Hupka (1910b), Heil (1910a) et Heil (1910b).
155. Hupka utilise les termes "Kugeltheorie" et "Relativtheorie" et son arrière-plan théorique fait usage du formalisme lagrangien. Il utilise également l'expression "potentiel cinétique", comme Planck, pour le Lagrangien Miller (1981, p. 311). Voir également Pyenson (2008, p. 181).

Faisant référence aux expériences de Kaufmann qui ne permettent pas encore de distinguer les théories de l'électron indéformable et de la relativité, et aux expériences de Bucherer qui concluent "sans ambiguïté" ["eindeutig"] à la validité de la théorie de la relativité [156], Hupka rappelle l'importance de la question théorique. De ce fait, "une nouvelle preuve obtenue de façon différente ne serait pas superflue" [157].

Le principe de l'expérience réalisée par Hupka est en partie similaire à celui de Bestelmeyer : les électrons suivent toujours la même trajectoire [158]. Pour ce faire, il ajuste le champ magnétique de déviation de telle sorte que l'impact des électrons sur l'écran fluorescent soit toujours le même, quelque soit la vitesse des particules. Hupka rappelle l'intérêt d'une telle procédure : les dimensions du dispositif n'interviennent pas dans le traitement des mesures [159].

Ainsi, les électrons, accélérés sous la différence de potentiel U, ont une vitesse $\beta = \frac{v}{c}$ qui satisfait à la relation :

$$eU = \mu_0 f(\beta), \tag{1.65}$$

où la fonction $f(\beta)$ dépend de la théorie considérée.

La déviation magnétique s'exprime ensuite en fonction du rayon de courbure de la trajectoire ρ comme :

$$\beta g(\beta) = \frac{\epsilon}{\mu_0}\frac{\rho}{c}B, \tag{1.66}$$

où la fonction $g(\beta)$ est une nouvelle fonction qui dépend de la théorie considérée. Considérant ensuite le champ magnétique B comme proportionnel à l'intensité du courant I circulant dans les bobines, il récrit la relation 1.66 comme :

$$\frac{\beta g(\beta)}{I} = \frac{\epsilon}{\mu_0}\frac{\rho}{c}K. \tag{1.67}$$

La constante de proportionnalité K est constante sur une trajectoire donnée.

Les grandeurs mesurées sont la tension U sous laquelle sont accélérés les électrons émis de la cathode par effet photoélectrique, l'intensité du courante I. Pour s'assurer

156. Hupka (1909, p. 249). Hupka s'exprime ainsi le 14 mai 1909, avant que les critiques de Bestelmeyer ne soient publiées.
157. Hupka (1909, p. 249) : "[Es] dürfte eine erneute Prüfung der Frage nach anderer Methode nicht überflüssig sein."
158. Aucune référence à Bestelmeyer n'est faite en ce qui concerne ce choix expérimental.
159. Hupka (1910b, p. 401).

qu'il travaille bien toujours sur la même trajectoire, il observe l'impact avec un microscope. Il affirme que la résolution du microscope lui permet d'observer des différences de position du spot de l'ordre de 0,015 mm. Enfin, la connaissance de la charge spécifique de l'électron est nécessaire. Il utilise la valeur mesurée par Classen en 1908, soit $\frac{\epsilon}{\mu_0} = 1,77.10^7$ [160].

La relation 1.65 lui permet de déduire une valeur de β pour chacune des théories à tester. Il injecte ensuite cette valeur dans la relation 1.67. Pour une même série de mesures, effectuées à trajectoire identique, la grandeur $\frac{\beta g(\beta)}{I}$ doit être constante.

Hupka présente dix séries d'environ 20 déviations chacune. L'intervalle de vitesse couvert s'étend de $\beta = 0,25$ à $\beta = 0,52$. La conclusion de Hupka est alors la suivante :

> "Le résultat le plus important de la recherche décrite ici est [...] une contribution à décider entre les théories concurrentes d'Abraham et de Lorentz-Einstein. Les mesures présentées sont en faveur de la dernière." [161]

Ces conclusions vont être étudiées et vivement critiquées par Heil. Celui-ci a terminé une thèse sous la direction de Planck l'année précédant la parution de l'article de Hupka, au sujet des mesures de Kaufmann. Alors qu'il finit sa thèse, il n'a pas encore connaissance du travail de Hupka [162], pourtant très probablement commencé en 1908. Dès l'annonce de ces nouveaux résultats expérimentaux en revanche, Heil les soumet à une critique pointue. Comme au cours de l'échange Bucherer-Bestelmeyer, la tension entre les deux jeunes chercheurs est sensible [163].

Les critiques de Heil concernent en premier lieu la mesure de la tension d'accélération des électrons. Hupka avait remarqué qu'une erreur de 1% sur cette mesure pouvait conduire à un meilleur accord avec la théorie d'Abraham. Mais il estimait en même temps cette erreur à $\pm 80V$ seulement. Heil montre alors que cela suffit à faire pencher les conclusions en faveur de la théorie d'Abraham [164].

En second lieu, il revient sur les dires de Hupka selon lesquels les déviations sont comprises entre 15 et 30 mm. Il calcule la trajectoire des rayons dans le dispositif de Hupka en utilisant les grandeurs mesurées, ainsi que les dimensions du tube. Il trouve une erreur importante sur ces déviations, et en déduit des sources d'erreurs non-

160. Classen (1908).
161. Hupka (1910a, p. 203-204) : "Das wichtigste Resultat der beschriebenen Versuche ist jedoch ein Beitrag zur Entscheidung der miteinander im Wettstreit liegenden Theorien von Abraham und Lorentz-Einstein. Die mitgeteilten Messungen sprechen zugunsten der letzteren."
162. Pyenson (2008, p. 181).
163. Selon Pyenson (2008), Planck travaille avec les deux chercheurs et tente de modérer leurs propos à paraître dans *Annalen der Physik*.
164. Heil (1910a, p. 520).

corrigées dans la mesure du champ magnétique. Ce point particulier de la polémique est intéressant car Hupka rappelle alors à Heil que les valeurs absolues des déviations et les dimensions précises du tube n'ont pas d'importance dans l'analyse des mesures. Mais Heil ne se satisfait pas de cette réponse. Des détails supplémentaires lui sont alors directement fournis par Hupka. Il a utilisé plusieurs tubes, mais n'a pas noté lequel avait été utilisé pour chaque série de mesure. Les déviations ne sont pas rigoureusement comprises entre 15 et 30 mm. Ces nombres ne sont qu'approximatifs. Heil se donne alors la peine de chercher alors avec quel tube Hupka a travaillé, mais est toujours perplexe quant aux valeurs extrêmes des déviations.

En conclusion, les critiques de Heil ne rejettent pas définitivement les résultats obtenus par Hupka, mais les mettent grandement en doute. Comme le concède Hupka au cours du débat :

> "Que ce soit du point de vue de la vitesse des rayons cathodiques étudiés ou de la précision de la mesure du potentiel, j'ai mené mes recherches jusqu'aux limites les plus extrêmes accessibles aux moyens d'aujourd'hui. Mes résultats sont en meilleur accord avec la théorie de la relativité qu'avec la théorie de l'électron sphérique. Pour le reste, j'aimerais souligner à nouveau que l'on n'a pas encore dit le dernier mot sur ce sujet. Il y aurait encore besoin pour cela de données d'observation abondantes, qui devront être obtenues par des méthodes aussi différentes que possibles." [165]

Deux autres expériences Durant la période 1908-1910, deux autres résultats sont annoncés qui ne rencontrent pas de contradicteurs mais qui n'expriment pas de conclusions aussi fermes que celles de Bucherer et de Hupka. Il s'agit de travaux menés par Charles Albert Proctor à Chicago, menés sous l'aile de Robert Millikan [166] et de ceux menés par Guye et Ratnowsky. Les conclusions du premier penchent en faveur de la théorie d'Abraham [167], celles du second en faveur de la théorie de

165. Hupka (1910b, p. 402) : "Bei meinen Versuchen bin ich sowohl in bezug auf die Geschwindigkeit der untersuchten Kathodenstrahlen als auch in bezug auf die Genauigkeit der Potentialmessungen bis zu äußersten Grenze gegangen, welche mit den heutigen Mitteln erreichbar ist. Meine Resultate lassen sich besser mit der Relativtheorie in Übereinstimmung bringen als mit der Kugeltheorie. Im übrigen möchte ich nochmals betonen, daß über diesen Gegenstand das letzte Wort nicht gesprochen ist. Es bedarf hierzu noch eines reichhaltigen Beobachtungsmaterials, das nach möglichst verschiedenen Methoden gewonnen werden muß."

166. Cette interprétation est tirée de la note de remerciement à la fin de Proctor (1910, p. 61) : "In conclusion I wish to express my great indebtedness to Professor Millikan to whose suggestion this work is due, and who has during its progress been ever ready with friendly interest and helpful advice."

167. Proctor (1909) et (Proctor, 1910).

Lorentz-Einstein [168]. Mais Proctor affirme :

> "The values computed from the Abraham formula are *perhaps* constant to within the limits of observational error, but those computed from the Lorentz formula *certainly* are not" [169]

tandis que Guye et Ratnowsky concluent que :

> "la théorie de l'électron indéformable ne donne pas en moyenne des résultats conformes à l'expérience pour les grandes vitesses.
> [...]
> D'autre part, les résultats de notre travail ne sont pas assez précis pour infirmer la formule de Lorentz-Einstein." [170]

Conclusion En 1911, aucune expérience ne semble en mesure de conclure définitivement en faveur de l'une ou l'autre des théories en présence : la théorie d'Abraham et une conception électromagnétique globale ou celle de Lorentz-Einstein et la validité du principe de relativité. Deux ans plus tard, von Laue écrit encore, dans la seconde édition datée de 1913 de *Das Relativitätsprinzip*,

> "La précision [des expériences de Kaufmann] n'était pas suffisante pour décider entre les deux théories. Et si plus tard encore de très remarquables expériences par Bucherer, Ratnowski [sic] et Hupka semblent s'exprimer en faveur de la théorie de la relativité, les avis sur leur caractère de preuve sont encore si partagés que, de ce point de vue [de la dynamique de l'électron] la théorie de la relativité n'a toujours pas reçu un support absolument indéniable." [171]

1.6.2.3 Conclusion (provisoire) : les expériences de Schaefer et Neumann (1911-1914) et Guye et Lavanchy (1913-1916)

Expériences de Neumann En 1911, Günther Neumann reprend les travaux de Bucherer dans le but de répondre aux critiques que Bestelmeyer avait soulevées. Comme pour Hupka, Heil, Proctor et Ratnowsky, il s'agit d'un travail de thèse, dont la conclusion paraît en 1914 [172].

168. Guye et Ratnowsky (1911).
169. Proctor (1910, p. 61).
170. Guye et Ratnowsky (1911, p. 320-321).
171. von Laue (1913, p. 18) : "Zu einer Entscheidung zwischen beiden Theorien reichte aber die Genauigkeit nicht aus. Und wenn auch später sehr bedeutende Experimente von Bucherer, Ratnowski, und Hupka zugunsten der Relativitätstheorie zu sprechen schienen, so sind doch die Meinungen über ihre Beweiskraft noch so geteilt, dass die Relativitätstheorie von dieser Seite eine unbedingt zuverlässige Stütze wohl noch nicht erhalten hat."
172. Neumann (1914).

Les premières mesures sont lancées en octobre 1911, mais elles ne mènent à aucun résultat. Une seconde campagne est réalisée entre décembre 1912 et avril 1913 [173]. Les premiers résultats sont communiqués le 22 septembre 1913 lors du 85^{e} *Naturforscherversammlung* [174] par le directeur de thèse de Neumann, Clemens Schaefer. Dans un intervalle de vitesse compris entre β=0,4 et β=0,7, la "théorie de Lorentz-Einstein" est vérifiée "avec une précision de 1,5 pour mille" [175].

L'expérience réalisée par Neumann est plus une reprise du travail de Bucherer qu'une expérience réellement nouvelle [176]. Le dispositif et le protocole sont identiques, et Bucherer participe à cette nouvelle expérience en mettant à disposition de Neumann l'appareil avec lequel il a travaillé trois ans plus tôt. Mais cette reprise tient compte des critiques de Bestelmeyer et propose des réponses qui se veulent définitives. Ainsi, Neumann est beaucoup plus précis dans sa description du dispositif, et dans l'analyse des différentes sources d'erreur.

> "Les remarques de Bestelmeyer au sujet du protocole et des indications d'erreurs [Fehlerangabe] seront autant que possible prises en considération" [177]

Il admet par exemple les difficultés qu'il a rencontrées au cours de la manipulation pour déterminer les déviations :

> "De considérables difficultés compliquaient la prise de mesure sur les plaques photographiques, c'est-à-dire la détermination de la déviation z." [178]

En effet, l'impact des rayons β enregistré sur les clichés ne forme pas une ligne suffisamment fine. Il s'agit plutôt d'une bande à l'intérieur de laquelle il observe des variations d'intensité. Il suppose que l'intensité maximale correspond aux rayons compensés, c'est-à-dire ceux qui ont la vitesse données par la relation 1.64.

Il revient sur l'interrogation quant aux possibles effets de bord et leur conséquence sur l'interprétation des déviations mesurées. Il montre de plus qu'il est "improbable" que la présence de rayons non-compensés soit la cause de la variation de la charge spécifique calculée selon la théorie d'Abraham, pour des valeurs de β comprises entre

173. Neumann inclut dans sa publication deux tableaux qui résument toutes ses tentatives de mesures. Sur les 55 enregistrements photographiques, seuls 26 sont analysés.
174. Schaefer (1913).
175. Schaefer (1913, p. 936).
176. Rappelons que l'idée fondamentale de Bucherer est de calculer la charge spécifique de l'électron et de chercher pour quelle théorie cette valeur est constante.
177. Neumann (1914, p. 530) : "Die Bemerkungen Bestelmeyers über Protokolle und Fehlerangaben sollen im folgenden weitmöglichst berücksichtigt werden."
178. Neumann (1914, p. 555) : "Der Ausmessung der Platten, d. h. der Bestimmung der Ablenkung z stellten sich erhebliche Schwierigkeiten in den Weg."

0,4 et 0,7. Pour des valeurs supérieures, il ne peut identifier la source des variations constatées de $\frac{\epsilon}{\mu_0}$. Il pense que d'autres recherches devraient être menées pour cela [179].

Il conclut en affirmant que :

> "La validité de la formule de Lorentz, qu'Einstein a également déduite plus tard de sa théorie de la relativité, est prouvée dans l'intervalle de vitesse $\beta = 0{,}4$ à β=0,7." [180]

Expérience de Guye et Lavanchy Une autre expérience est annoncée en septembre 1914 par Guye et Lavanchy. Elle est annoncée comme une amélioration de l'expérience menée par Guye et Ratnowsky quatre ans auparavant. Une première conclusion est annoncée le 01 juillet 1915 à la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève (SPHN) :

> "Les résultats obtenus jusqu'ici sont résumés dans le tableau de la page précédente, qui vérifie d'une façon tout à fait remarquable la formule de Lorentz-Einstein sur la variation d'inertie en fonction de la vitesse." [181]

Conclusion Les expériences de Neumann sur les rayons β et Guye et Lavanchy sur les rayons cathodiques ne donnent pas lieu à des critiques du type de celles qu'ont reçu les expériences de Bucherer et Hupka. En fait, elles ne sont pas du tout remises en cause avant 1938 pour la première et 1957 pour la seconde [182] .

1.6.3 Analyse critique (mais non historique) des conclusions obtenues dans les années 1910

Après dix années de recherches expérimentales laborieuses, au cours desquelles les techniques d'investigation ont été poussées à leur maximum, il semble qu'une conclusion enfin acceptée a été obtenue. Neumann d'une part, Guye et Lavanchy de l'autre, sont parvenus à établir la validité de la formule de Lorentz-Einstein sans que quiconque n'émette de critique à leur égard qui viendrait jeter le doute sur leur conclusion.

179. Voir la discussion de Neumann dans Neumann (1914, p. 574-575).
180. Neumann (1914, p. 578) : " Die Gültigkeit der Lorentzschen Formel, die Einstein später auch aus seiner Relativitätstheorie entwickelt hat, ist im Geschwindigkeitsbereich $\beta = 0{,}4$ bis β=0,7 erwiesen."
181. Guye et Lavanchy (1915b, p. 167).
182. Notons également l'expérience réalisée par L.T. Jones en 1916. Sa conclusion en faveur de la formule de Lorentz-Einstein semble être passée assez inaperçue. Voir Jones (1916).

Critiques de Zahn et Spees en 1938 En 1938 cependant, les conclusions de Neumann sont rejetées par l'analyse des physiciens américains C.T. Zahn et A.H. Spees [183]. Ceux-ci remettent en cause l'efficacité de son filtre de vitesse ainsi que l'analyse qu'il fait des enregistrements photographiques.

En premier lieu, ils montrent que le filtre de vitesse tel qu'il est conçu par Neumann cesse de fonctionner au delà de $\beta = 0{,}7$. Les maxima d'intensité dans les bandes enregistrées sur la plaque photographique ne correspondent alors pas à l'impact de rayons ayant la vitesse supposée filtrée, mais sont le reflet de la distribution de vitesses de la source elle-même. De plus, pour des valeurs de β inférieures à 0,7, la résolution du filtre est telle que la bande enregistrée sur la plaque photographique a une largeur relative du même ordre que l'augmentation relative de la masse prédite par la formule de Lorentz-Einstein, un fait "étonnant et perturbant" [184].

D'après l'analyse de Zahn et Spees, la difficulté tient en grande partie à interpréter des maxima d'intensité qu'il est toujours possible d'observer. Ils montrent en effet que l'arrangement géométrique choisi par Neumann dans le but d'obtenir des lignes bien définies lui cache le faible pouvoir de résolution de son filtre, du fait d'une focalisation "artificielle" du faisceau [185]. Comme ils le remarquent, "Bestelmeyer avait soulevé la question du pouvoir de résolution fini de l'instrument" [186]. Mais, à l'époque, sa remarque n'avait pas reçu de réponse satisfaisante. Bucherer ne s'y était intéressé que superficiellement et Neumann de façon biaisée par son interprétation des bandes qu'il observe.

D'après cette analyse renouvelée de l'expérience menée par Neumann, Zahn et Spees concluent :

> "Sur la base de la présente discussion, il semble juste de dire que les expériences de Bucherer-Neumann ne montre pas grand chose de plus que les expériences de Kaufmann qui indiquaient une augmentation qualitative importante de la masse avec la vitesse." [187]

183. Zahn et Spees (1938a).
184. Zahn et Spees (1938a, p. 519) : "This reveals the astonishing and disturbing fact that the actual spreads in the beam transmitted by the condenser, even under the best conditions, were of approximately the value as the momentum variation caused by the whole relativistic change of mass."
185. Zahn et Spees (1938a, p. 511) : "[...] with a certain choice of geometrical constants, a very poor resolving power may be concealed by spurious focusing effects — and that it was just this choice that Neumann, by trial, found necessary to make in order to obtain sharp lines."
186. Zahn et Spees (1938a, p. 512) : "[...] Bestelmeyer raised the question of the finite resolution power of the instrument."
187. Zahn et Spees (1938a, p. 519).

Critique de Faragó et Jánossy en 1957 Ainsi, après 1938, seule la conclusion de Guye et Lavanchy tient encore. Ce sera le cas pendant 19 années de plus, jusqu'à l'analyse proposée par P. S. Faragó et L. Jánossy en 1957 [188].

Ces deux physiciens hongrois proposent une revue des expériences supposées fournir la preuve de la formule de Lorentz-Einstein depuis Kaufmann. Leur analyse se concentre sur les expériences de Guye et Lavanchy, la dernière de celles menées entre 1906 et les années 1930 qui n'a pas encore été soumise à une critique négative. Cette expérience présente de plus l'intérêt qu'un très grand nombre de données "brutes" ont été publiées en 1921 [189].

Leur réflexion se fonde sur une analyse statistique des données présentées par Guye et Lavanchy. En effet, ils considèrent que le traitement qui en a été fait par Guye et Lavanchy ne permet pas de se prononcer "clairement" en faveur de l'une ou l'autre des théories.

> "Ces auteurs caractérisent l'écart des résultats expérimentaux à la théorie en évaluant la *valeur moyenne arithmétique de la différence entre des valeurs expérimentales moyennées et les valeurs théoriques attendues*. A notre avis, cette procédure ne reflète pas clairement la validité des théories supposées." [190]

Les différentes grandeurs mesurées permettent de déterminer différents couples de valeurs $(k_1 m\,;k_2 \frac{v^2}{c^2})$, où k_1 et k_2 sont des constantes et m est la masse transverse à la vitesse v. Guye et Lavanchy ont réalisé deux séries contenant respectivement 85 et 67 mesures. Faragó et Jánossy calculent les couples correspondant à chacune de ces mesures. Il travaillent ensuite avec les variables $(X_i\,;Y_i)$, où $X_i = k_2 \left[\left(\frac{v_i}{c}\right)^2 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2\right]$ et $Y_i = k_1 m_i - k_1 m_0$. L'indice i correspond à mesure i et l'indice 0 à la moyenne obtenue sur toutes les mesures. Leur objectif est alors de déterminer la fonction f

188. Faragó et Jánossy (1957). Les autres expériences proposées entre 1930 et 1957 ne sont pas toutes présentées par Faragó et Jánossy. Ils excluent ainsi de leur analyse les expériences de Nacken et Lahaye menées en Allemagne entre 1935 et 1939. Ils présentent en revanche deux autres travaux. En 1938, Zahn et Spees tirent profit de leur analyse et affirment avoir montré la validité de la formule de Lorentz avec une précision de l'ordre de 1,5 % (Zahn et Spees, 1938a). Fin 1939, M.M. Rogers, A.W. McReynolds et F.T. Rogers affirment être parvenus à montrer la validité du modèle d'électron de Lorentz aux dépens de celui d'Abraham (Rogers *et al.*, 1940). Ils travaillent également sur des rayons β mais du fait de leur meilleure connaissance du spectre d'émission de leur source et d'un champ électrique radial pour focaliser les électrons sur un spectrographe électrostatique. Dans ces deux cas, les articles contiennent un nombre insuffisant de données. Il est de ce fait difficile d'en proposer une analyse critique.

189. Guye (1921).

190. Faragó et Jánossy (1957, p. 1423 ; nous soulignons) : "The deviation of the experimental results from the theory is characterized by these authors by evaluating the *arithmetic mean value of the difference between some averaged experimental values and the theoretically expected values*. In our opinion, this procedure does not reflect clearly upon the validity of the assumed theories." Nous explicitons la "procédure" suivie par Guye et Lavanchy au chapitre 3.3.4.

qui s'ajuste le mieux avec les points $(X_i\,;Y_i)$, selon le critère classique des moindres carrés :

$$\sigma^2 = \sum_i (f(X_i) - Y_i)^2 = \text{minimum.} \tag{1.68}$$

Leur analyse montre que la fonction f peut être considérée comme linéaire car "la dispersion des données expérimentales sur l'intervalle [de vitesse] relativement petit est assez élevé"[191]. Ainsi, les "données expérimentales ne fournissent pas d'information réelle au delà de la première approximation [ie. l'approximation linéaire]"[192]. Ils en déduisent, pour la première série de mesure :

$$\frac{m}{m_0} - 1 = 0,52 \left[\left(\frac{v}{c}\right)^2 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2 \right],$$

où les indices 0 font toujours référence aux valeurs moyennes des grandeurs considérées. Le coefficient a=0,52 est déterminé avec une erreur relative de 0,09.

Pour comparer les données expérimentales avec chacune des théories, Faragó et Jánossy considèrent l'approximation des prédictions théoriques sur l'intervalle de vitesse dans lequel les mesures ont été effectuées. Ils écrivent cette approximation comme :

$$\frac{m}{m_0} - 1 = B_1 \left[\left(\frac{v}{c}\right)^2 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2 \right].$$

À nouveau, l'intervalle de vitesse réduit permet de ne tenir compte que des termes en β^2. La comparaison des valeurs de B_1 pour chacune des théories avec le coefficient a montre finalement que :

> "les résultats expérimentaux publiés par Guye *et al.* sont compatibles avec la théorie de la relativité ; la dispersion des données mesurées produit cependant une erreur qui est comparable avec la différence entre les expressions relativiste et d'Abraham."[193]

En conclusion, l'analyse statistique plus rigoureuse que celle effectuée par Guye

191. Faragó et Jánossy (1957, p. 1428) : "[...] the spread of the experimental data within the relatively small interval is rather high [...]
192. Faragó et Jánossy (1957, p. 1429) : "[...] the experimental date give no real information beyond the first approximation."
193. Faragó et Jánossy (1957, p. 1431-1432) : "[...] the experimental results published by Guye *et al.* are compatible with the relativity theory ; the spread of the measured data, however, produces an error which is comparable with the difference existing between the relativistic and Abraham's expressions."

et Lavanchy 40 ans plus tôt montre que leurs résultats ne peuvent plus, en 1957, être considérés comme "vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein".

1.6.4 Pour une relecture historique des expériences des années 1910

1.6.4.1 Le point de vue des historiens

Les critiques de Zahn et Spees puis de Faragó et Jánossy sont considérées comme ayant démontré que les travaux réalisés dans les années 1910 ne pouvaient pas prétendre à la précision suffisante pour rejeter la théorie d'Abraham ou confirmer la théorie de la relativité sur des bases expérimentales. Sans aller jusqu'à considérer ces analyses comme *arguments historiques* contre le rôle qu'ont joué ces expériences dans l'acceptation de la théorie de la relativité, de nombreux historiens laissent planer un certain doute : ces expériences ne prouvaient de toute façon pas grand chose puisque la précision qu'il leur était possible d'atteindre n'était pas meilleure que la différence entre les formules d'Abraham et de Lorentz-Einstein. Ainsi, pour Hon,

> "[c]ette critique de Faragó et Jánossy pointe le cœur du problème : pour faire la distinction expérimentale entre la théorie de l'électron d'Abraham et celle de Lorentz et Einstein, une marge d'erreur expérimentale moindre que la différence entre les résultats théoriques respectifs doit être obtenue. C'est une tâche considérable puisque la différence est vraiment très faible." [194]

Plus récemment, Janssen affirme que les expériences réalisées jusqu'en 1915 ont "produit un consensus" autour du fait que les données expérimentales sont en faveur de la formule de Lorentz-Einstein. Pourtant, il envisage les analyses de Zahn et Spees, et Fárago et Jánossy comme jetant le doute sur les conclusions de ces expériences [195].

Des analyses effectuées entre 20 et 40 ans après la publication des résultats expérimentaux peuvent-elles réellement être utilisées par l'historien pour analyser les expériences et leurs conclusions ? La question ne devrait-elle pas plutôt être de savoir comment ces expériences ont été reçues dans *leur* contexte historique et scientifique ? Alors, l'analyse *historique* de ces expériences devrait non pas reposer sur les analyses *a posteriori* mais sur des éléments propres au contexte spécifique dans lequel ces expériences ont été réalisées et interprétées.

194. Hon (1995, p. 186-197) : "This critical view of Faragó and Jánossy points at the heart of the problem : to distinguish experimentally between Abraham's theory of the electron and that of Lorentz and Einstein, a margin of experimental error which is less than the difference between the respective theoretical results has to be attained. This is a considerable task since the difference is indeed very small."; voir également le paragraphe 12.4.5 dans Miller (1981, p. 330-333).
195. Janssen (2009, p. 35).

En effet, les critiques proposées par Zahn et Spees puis par Fárago et Jánossy reposent respectivement sur des connaissances expérimentales que ne possédaient pas Bucherer ou Neumann, et des méthodes d'analyse de données qui n'étaient pas utilisées dans le domaine de la physique des rayonnements électriques [196].

Janssen pose la question comme ceci :

> "Une nouvelle analyse des données plusieurs décennies après a montré qu'aucune de ces expériences n'était assez précise pour faire la distinction entre les différentes prédictions sur la dépendance de la masse de l'électron à sa vitesse. Abraham, Lorentz et Einstein ont attaché une importance de principe aux expériences, spécialement quand les données semblaient favoriser leur propre théorie [...], mais *on ne sait pas clairement à quel point il les ont prises au sérieux.*" [197]

1.6.4.2 Réception des expériences de Neumann et de Guye et Lavanchy autour de 1920

Quelques lettres Le 10 octobre 1918 [198], Friedrich Adler écrit à Einstein pour lui demander quelles expériences constituent des preuves de la variation de l'inertie des électrons avec leur vitesse. 10 jours plus tard, Einstein lui répond que trois travaux récents ont montré "de façon certaine" les "équations relativistes du mouvement des électrons" : l'expérience de Neumann, celle "indirecte" sur la structure fine des raies de l'hydrogène, et celle de Guye et Lavanchy [199].

Le 12 janvier 1920, Einstein écrit à Guye :

> "Vos recherches sur le mouvement des électrons font à mon avis partie des plus importantes confirmations de la théorie de la relativité restreinte. Je ne me souviens plus si je vous ai déjà exprimé ma joie au sujet de la réussite de ces recherches minutieuses." [200]

196. Nous ne pouvons justifier cette affirmation avec la rigueur qu'une question aussi importante nécessiterait. Elle repose néanmoins sur l'absence d'une telle analyse dans les travaux que nous avons étudiés. De plus, de nombreux historiens des sciences "expérimentés" semblent en accord avec nous sur ce point. La question de l'analyse des mesures dans l'histoire des sciences reste un sujet encore à étudier dans le détail.

197. Janssen (2009, p. 35 ; nous soulignons) : "Reanalysis of the data decades later showed that none of these experiments were accurate enough to distinguish between the different predictions for the velocity dependence of the electron mass. Abraham, Lorentz, and Einstein all paid lip service to the importance of the experiments, especially when the data seemed to favor their own theories [...], but *it is not clear how seriously they really took them.*"

198. Einstein (1997, Lettre 632).

199. Einstein (1997, Lettre 636).

200. Lettre conservée au Musée d'histoire des sciences de Genève, sous la référence Z281/1 n°7 et publiée dans Einstein (2004, Lettre 255) : "Ihre Untersuchugen [sic] über die Elektronenbewegung

Neuf jours plus tard, Guye répond :

> "J'ai été très sensible à votre appréciation sur les travaux de notre Laboratoire concernant le mouvement des électrons et votre avis, joint à celui de Larmor qui m'avait écrit un mot dans le même sens m'a causé une vive satisfaction." [201]

Deux ans plus tard, le 18 avril 1922, Einstein récrit à Guye et lui annonce :

> "Nous avons consacré ici [à Berlin] un séminaire entier à vos travaux sur la loi du mouvement de l'électron et nous pensions de façon unanime que votre confirmation de la théorie est la plus précise de toutes." [202]

Le 29 décembre de la même année, Starke écrit également à Guye :

> "je vous prie, Mr. le professeur, de vouloir me permettre la demande empressée d'un exemplaire de votre mémoire sur la vérification de la formule de Lorentz-Einstein que vous avez donnée avec Mrs. Ratnowsky et Lavanchy, d'une façon qui à ce qu'il me semble ne peut pas être surpassée. C'est de mon collègue prof. v. Laue que dans ce moment je me suis preté votre publication intéressante, mais pour une étude approfondie, il serait d'une grande importance pour moi d'en posséder un exemplaire." [203]

Einstein et ses collègues de Berlin, Larmor, l'expérimentateur spécialiste des rayons cathodiques, Hermann Starke, sont tous satisfaits des expériences de Guye et Lavanchy : elles constituent la confirmation "la plus précise". Ces avis sont à l'opposé des critiques soulevées dans les années 1950 et confirment ainsi la nécessité de revenir sur l'interprétation de ces expériences dans leur contexte propre.

Ouvrages généraux sur la théorie de la relativité La lecture d'ouvrages d'enseignement ou de diffusion de la théorie de la relativité invite à la même analyse : l'histoire des expériences sur la variation de l'inertie de l'électron avec la vitesse aboutit, avec les conclusions de Guye et Lavanchy et de Neumann, à la confirmation *définitive* de la formule de Lorentz-Einstein.

gehört [sic] nach meiner Ansicht zu den wichtigsten Bestätigungen der speziellen Relativitätstheorie. Ich erinnere mich nicht, ob ich Ihnen damals meine Freude über das Gelingen dieser feinen Untersuchungen ausgedrückt habe."

201. Einstein (2004, Lettre 273).

202. Lettre d'Einstein à Guye conservée au Musée d'histoire des sciences de Genève, sous la référence Z281/1 n°10 ; "Wir haben uns hier im Seminar ausführlich mit Ihrer Arbeit über das Bewegungsgesetz der Elektronen beschäftigt und waren einstimmig der Meinung, dass Ihre Bestätigung der Theorie die präziseste von allen ist".

203. Cette lettre, écrite en français, est conservée au Musée d'histoire des sciences de Genève sous la référence Z281/2 n°5. Nous la reproduisons à l'annexe B.

D'après Wolfgang Pauli, les expériences des années 1908-1910 avaient montré que la "formule relativiste" était "la plus probable". Puis, les expériences de Neumann et de Guye et Lavanchy sont venues confirmer cette interprétation "sans ambiguïté"[204]. De la même manière, dans la préface au volume 4 des *Vorlesungen* de Lorentz, en 1929, Adriaan Daniël Fokker estime que ces expériences "ont levé tous les doutes" qui persistaient dans les travaux précédents, et qu'il faut maintenant les inclure dans le chapitre retravaillé sur les "preuves expérimentales de la théorie" de la relativité[205]. Paul Langevin émet un avis plus nuancé quant aux expériences de Neumann dont il estime que "la précision est moindre"[206]. Pour ce qui est des expériences de Guye et Lavanchy, il affirme que :

> "[d]es expériences *très soignées* faites récemment [...] par MM. Ch.-Eug. Guye et Lavanchy ont *exactement* vérifié la loi prévue pour des vitesses de rayons cathodiques allant jusqu'à 150 000 km par seconde, moitié de la vitesse de la lumière."[207]

Ces différents avis, exprimés dans des correspondances ou dans des ouvrages généraux sur la théorie de la relativité, ne trouvent à notre connaissance aucun contradicteur. Les expériences de Guye et Lavanchy ne soulèvent aucune critique, aucun débat. Les expériences de Neumann avec les rayons β laissent semble-t-il un peu plus de place au doute. Le seul auteur à émettre un avis différent est Lenard, dans le volume 14 sur les rayons cathodiques des *Handbuch der Experimental Physik*, mais il ne propose aucun argument si ce n'est celui de rappeler le résultat contradictoire de Proctor[208].

Les expériences de Guye jugées par les expérimentateurs La réaction de Lenard pose l'interrogation suivante. Pourquoi un expérimentateur de son calibre,

204. Pauli (1958, p. 83).
205. Lorentz (1929, Vorwort) : "Sie durften in dem Kapitel über die experimentellen Beweise der Theorie nicht mehr fehlen, da sie alle Zweifel, die der Beweiskraft früherer Resultate entgegengebracht wurden, vollständig aufzuheben imstande sind."
206. Langevin (1950a, p. 456) : "Les rayons β des corps radioactifs permettent, comme nous l'avons vu, d'opérer avec des vitesses beaucoup plus grandes [que les rayons cathodiques], mais la précision est moindre [...]".
207. Langevin (1950a, p. 456 ; nous soulignons).
208. "Alors qu'une recherche [Proctor] dans le domaine de vitesse $v = 0{,}12$ à $0{,}43$ est en faveur de l'électron indéformable, deux autres [Guye et Ratnowsky ; Guye et Lavanchy] à peu près dans le même domaine de vitesse croient pouvoir trancher contre lui.", Lenard *et al.* (1927, p. 419) : "Während die eine Untersuchung im Geschwindigkeitsbereich v= 0,12 bis 0,43 für das „starre Elektron" spricht, glauben zwei andere Untersuchungen im nahe gleichen Geschwindigkeitsbereich zuungunsten desselben entscheiden zu können."

malgré ses idées politiques et leur influence sur sa réflexion scientifique [209], ne trouve-t-il rien à redire sur une expérience dont la conclusion n'est a priori pas pour lui convenir ? De même, l'exposé que Gerlach fait des travaux de Guye entre 1907 et 1915 est à lire comme celui d'un expérimentateur reconnu, au fait des subtilités et des difficultés propres à ce type d'expérience. Or, il ne fait que décrire le dispositif et la méthode de Guye, valide les approximations faites, justifie les choix techniques et conclut que la théorie d'Abraham est "de façon systématique et largement au dessus des barres d'erreur" [210].

Les tenants de la recevabilité des critiques de Zahn et Spees *pour l'historien* feront remarquer que le même Gerlach pense qu'il n'y a "aucune raison de douter de la véracité des résultats des recherches de Bucherer, Wolz, Schaefer et Neumann" [211]. Mais, à nouveau, les critiques de 1938 se fondent sur des connaissances qui ne sont pas établies en 1926. Tout au plus cette remarque de Gerlach nous montre qu'il y a débat sur la validité des expériences sur les rayons β, débat que nous ne trouvons nulle part en ce qui concerne les résultats de Guye et Lavanchy.

De même, la demande de Starke citée précédemment est celle d'un expérimentateur qui proposera une nouvelle vérification expérimentale de la formule de Lorentz [212] en 1934 et qui s'est déjà penché sur la question en 1903. Il est au fait des difficultés expérimentales, de leur impact sur la précision et des façons de les résoudre.

Les expériences de Guye dans les ouvrages de diffusion de la théorie de la relativité Si les expérimentateurs ont un regard aiguisé sur les questions propres au travail de Guye et Lavanchy, que penser de l'attitude de physiciens comme Einstein [213], Langevin ou Pauli ? En Allemagne, au début des années 1920, des attaques assez dures sont lancées par certains nationalistes anti-relativistes [214]. Il est légitime

209. van Dongen (2007).
210. Gerlach (1926, p. 77) : "[...] der Abrahamschen Theorie systematisch und in einem die Fehlergrenzen weit übersteigenden Maße abweicht."
211. Gerlach (1926, p. 72) : "Es besteht somit heute kein Grund, an der Richtigkeit der Resultate der Untersuchung de Bucherer, Wolz, Schaefer et Neumann zu zweifeln [...]".
212. Starke et Nacken (1934), Nacken (1935). En 1934, Starke et Nacken ne font pas référence à Einstein, si ce n'est à la fin de leur article pour contredire sa proposition de vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein en 1906. Miller interprète ceci comme le reflet de la situation politique de l'Allemagne des années 1930 ; Miller (1981, p. 323).
213. Il serait intéressant de trouver des informations sur le séminaire auquel Einstein fait référence dans sa lettre d'avril 1922 à Guye. Qui sont les personnes présentes ? Y'a-t-il des traces de l'analyse qu'il font de l'expérience de Guye et Lavanchy ?
214. van Dongen (2007).

de penser qu'une expérience récente supplémentaire qui se prononce en faveur de la relativité est la bienvenue pour formuler une réponse argumentée à ces "critiques". En France, Langevin fait partie des principaux promoteurs de la relativité. À nouveau, un travail "*très soigné*" qui confirme l'une des prédictions les "plus facilement vérifiables par l'expérience"[215] ne peut que trouver sa place dans un exposé sur les "confirmations expérimentales" de la théorie de la relativité[216].

Un exemple qui illustre bien la place de l'expérience de Guye dans la littérature des années 1920 sur la relativité est tiré de la revue *La science et la vie* de juillet 1922. Un article est consacré aux "théories d'Einstein et leur vérification expérimentale"[217]. Rédigé par Léon Brillouin, cet article expose des idées assez générales sur la théorie de la relativité restreinte puis générale. Dans l'histoire qu'il reconstruit, les expériences de Michelson et Morley sont à l'origine de l'hypothèse de contraction de Lorentz-Fitzgerald, qui débouche sur la relativité telle qu'exposée par Einstein. Malgré les difficultés de ces nouvelles conceptions, "chaque fois qu'une conséquence nouvelle a pu être soumise au contrôle expérimental, elle s'est toujours trouvée vérifiée."[218] L'"inertie de l'énergie", expression reprise de Langevin dont l'influence se fait sentir sur le jeune Brillouin, a pour conséquence la variation de la masse avec la vitesse. "Cette variation de masse a été vérifiée expérimentalement. [...] des recherches récentes, dirigées par le professeur Ch.-Eug. Guye, de Genève, ont permis une vérification intéressante et complète."[219] Après l'exposé de l'expérience de Guye et Lavanchy, accompagné des photographies publiées par Guye en 1921, il passe à la relativité générale. Il se livre alors, de la même façon que précédemment à la description des expériences confirmant les prédictions théoriques : avancée du périhélie de Mercure, déviation de la lumière sous l'effet d'un champ de gravitation, décalage spectral vers le rouge de la lumière émise par une étoile. Sa conclusion est assez étonnante de par la place qu'elle accorde aux expériences de Guye, comme le montre le dernier paragraphe de cet article que nous citons entièrement :

> "On peut donc conclure de tout ce qui précède que les théories d'Einstein apportent un bouleversement complet dans nos habitudes de pensée ; elles changent les postulats fondamentaux de la science et nous obligent à renoncer à toute

215. Langevin (1950a, p. 453).
216. Langevin (1950a, p. 436) : "La vérification complète, qualitative et quantitative de cette prévision [la déviation de la lumière par le champ de gravitation du soleil], venant après d'autres confirmations expérimentales non moins frappantes dont j'ai l'intention de vous entretenir ici [...]"
217. Brillouin (2000).
218. Brillouin (2000, p. 61).
219. Brillouin (2000, p. 63).

> une série d'anciens préjugés, profondément ancrés dans nos esprits. Mais cette révolution est extrêmement féconde ; la théorie nouvelle regroupe avec une très grande généralité toutes nos notions antérieures, elle s'adapte avec la plus complète aisance à toutes les expériences anciennes, mais, surtout, son succès est d'avoir prévu des faits nouveaux, et avec le plus grand bonheur : l'inertie de l'énergie, la variation de la masse avec la vitesse ont longtemps paru des affirmations impossibles à contrôler ; les belles expériences de Guye ont conduit à une vérification complète. De même les prévisions de la relativité généralisée sont actuellement nettement confirmées."[220]

Si tous ne sont pas aussi emphatiques que Brillouin, tous considèrent que l'expérience de Guye et Lavanchy est une vérification expérimentale *définitive* de la théorie de la relativité restreinte. À nouveau, les conclusions des années 1950 se voient interrogées.

1.6.4.3 Pistes pour une analyse historique de l'expérience de Guye et Lavanchy

Lorsque l'on songe, par exemple, à la façon dont Einstein juge les expériences de Kaufmann[221], il serait facile de penser que des physiciens, impliqués dans la défense, l'acceptation et la diffusion d'une théorie, se servent des résultats d'une expérience qui va dans leur sens comme d'un argument simplement rhétorique. Il est d'ailleurs envisageable que l'expérience ait une telle fonction dans une démarche de diffusion d'une théorie physique. Doit-on pour autant en conclure que ces physiciens se seraient satisfaits d'une expérience quelconque ? L'expérience ne doit-elle pas plutôt remplir certaines conditions qui la rendent plus acceptable qu'une autre ?

Dans le cas de l'expérience de Guye et Lavanchy, Fokker dit :

> "Un très beau complément à ces expériences [de Neumann] a été apporté par Guye et Lavanchy à Genève, qui ont travaillé avec des rayons cathodiques de vitesse comprise entre β=0,26 et β=0,48."[222]

Il expose la méthode expérimentale utilisée par Guye et Ratnowsky puis améliorée par Guye et Lavanchy, puis décrit le dispositif utilisé par ces derniers. La présentation des résultats insiste sur le nombre de photographies "valables" ("brauchbare Platten"), 150[223], et sur l'accord "bien meilleur" ("sehr viel besser") entre l'expérience

220. Brillouin (2000, p. 65).
221. Voir chapitre 1.6.2.1.
222. Lorentz (1929, p. 124).
223. Dans le cas de l'expérience de Neumann, seules 26 clichés sont "valables".

et la théorie de Lorentz plutôt que celle d'Abraham. Le cliché présenté par Guye en 1921 et la comparaison entre les courbes théoriques et expérimentales viennent clore cette présentation.

L'enregistrement photographique [224] et le nombre élevé de mesures semble significatif dans la présentation faite par Fokker. Gerlach précise en outre que les mesures et l'enregistrement ne prennent que 5 à 10 s. Les expériences de Kaufmann nécessitaient 48 h, celles de Bucherer entre 4 et 60 h [225], celles de Neumann entre 7 et 16 h [226].

Ce rapide comparatif est bien sûr incomplet, mais il indique déjà des conditions expérimentales satisfaites dans l'expérience de Guye et Lavanchy : nombre élevé de mesures, rapidité de l'enregistrement photographique. Les autres références à cette expérience sont moins explicites. Ce sont des expériences "très soignées", "très difficiles" ; les mesures sont "très précises". Quant à la comparaison entre les mesures et la théorie, la seule analyse proposée consiste à constater que la moyenne arithmétique des écarts est très faible pour la formule de Lorentz-Einstein. Autrement dit, les points expérimentaux ne s'éloignent pas trop de la courbe théorique et les écarts sont aussi bien négatifs que positifs. Nous sommes loin de l'analyse proposée par Faragó et Jánossy.

Les points abordés dans ce paragraphe fournissent quelques pistes pour comprendre en quoi l'expérience de Guye et Lavanchy peut faire figure de vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein. Il est désormais nécessaire de pousser plus loin l'analyse, afin de répondre à la question suivante :

> Pour quelles raisons un physicien des années 1920, peut-il considérer l'expérience de Guye et Lavanchy comme vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein ?

224. Parmi les expériences réalisées avec des rayons cathodiques, Guye et Lavanchy sont les premiers à utiliser l'enregistrement photographique plutôt que la lecture directe sur le fond du tube.
225. Bucherer (1909b, p. 520).
226. Neumann (1914, tableau de mesures).

Conclusion

Au cours des toutes premières années du XX^e siècle, l'étendue de la théorie électromagnétique de Lorentz et les succès qu'elle rencontre permettent à certains physiciens d'envisager une possible conception électromagnétique globale de toute la physique, une réduction des concepts mécaniques à des concepts électromagnétiques. Ainsi, l'inertie newtonienne ne serait plus un concept premier, mais serait dérivé des propriétés électriques et magnétiques de la matière. La particule fondamentale serait l'électron, l'"ion" de Lorentz responsable de l'interaction éther/matière.

Abraham est le premier à proposer une "dynamique électromagnétique de l'électron" dans laquelle les lois du mouvement sont déduites de l'analyse de l'auto-interaction entre l'électron et le champ électromagnétique qu'il génère lorsqu'il est en mouvement. L'inertie électromagnétique trouve alors son origine dans le fait que la mise en mouvement de l'électron nécessite un travail extérieur qui modifie son énergie totale. Peut-on montrer que toute l'inertie se résume à l'inertie électromagnétique ?

Selon Abraham, l'électron est une sphère indéformable uniformément chargée. Il déduit une masse longitudinale et une masse transverse : la masse n'est pas la même selon qu'une force tangentielle ou normale est exercée sur l'électron. De plus, ces masses ne sont pas constantes. Elles augmentent indéfiniment à mesure que la vitesse de l'électron se rapproche de la vitesse de la lumière.

Selon Lorentz, l'électron est une sphère lorsqu'il est au repos absolu. Mais il se contracte longitudinalement lorsqu'il est en mouvement. Cette hypothèse permet à Lorentz d'expliquer l'absence d'effet observable du déplacement de la Terre par rapport à l'éther (le vent d'éther), ce qu'Abraham ne parvient pas à faire. En revanche, l'électron déformable de Lorentz ne peut être purement électromagnétique. Sans une pression interne d'origine inconnue assurant la cohésion de ses parties, il n'est pas stable.

En 1905, Einstein place le principe de relativité et la constance de la vitesse de la lumière à la base de son "électrodynamique des corps en mouvement". Ses prédictions expérimentales coincident avec celles de Lorentz, en particulier la variation de l'inertie avec la vitesse. La masse transverse est donnée par la formule qui s'appellera alors "formule de Lorentz-Einstein". Cette assimilation est significative de la confusion entre les théories de Lorentz et d'Einstein.

Grâce à l'élaboration de la théorie de la relativité restreinte entre 1906 et 1911, celle-ci finit par être interprétée comme essentiellement différente de celle de Lorentz.

Mais il faut attendre les années 1920 pour que ceci soit reconnu au delà du cercle des relativistes spécialistes.

Sur le plan expérimental, Kaufmann conclut en 1906 au rejet de l'"hypothèse de Lorentz-Einstein" et à la validation de celle d'Abraham. Le principe de relativité n'est donc pas valable. L'inertie est entièrement électromagnétique. Ces conclusions ont un impact retentissant et sont le sujet de vifs débats au cours desquels la validité de l'expérience de Kaufmann est remise en cause.

Les années 1908-1910 voient de nouvelles expériences être menées, qui donnent également lieu à des débats pointus. Malgré le doute dont font l'objet leurs conclusions, ces expériences semblent créer le consensus : la formule de Lorentz-Einstein s'accorde mieux avec l'expérience que celle d'Abraham. Quel est leur impact réel ? Leur étude serait certainement l'occasion de répondre à cette question en suspens. Elles n'ont en tout cas pas créé un consensus suffisant car Von Laue affirme en 1913 qu'elles ne constituent pas un "support indéniable" de la théorie de la relativité.

Entre 1913 et 1916, de nouvelles expériences sont menées. Elles concluent à nouveau en faveur de la formule de Lorentz-Einstein, sans donner lieu cette fois à des critiques aussi poussées que les précédentes. En particulier, l'expérience de Guye et Lavanchy fait figure dans les années 1920 de preuve "classique" de la variation relativiste de la masse. Elle est considérée comme la plus précise.

Mais, en 1957, une analyse statistique plus raffinée des mesures de Guye et Lavanchy conclut qu'elles ne peuvent plus être considérées comme s'accordant si bien avec la formule de Lorentz-Einstein. En fait, selon les critères définis par les auteurs de cette nouvelle analyse, l'expérience pourrait tout autant être considérée comme en faveur de la formule d'Abraham.

Cette interprétation est radicalement opposée à celles que nous avons mises à jour par l'étude d'ouvrages de diffusion et d'enseignement de la théorie de la relativité. Elle va également à l'encontre des interprétations exprimées en privé, retrouvées dans la correspondance de Guye. Nous pouvons toutefois formuler quelques hypothèses pour résoudre le problème de la réception de l'expérience de Guye et Lavanchy.

La première correspond à celle émise par Brush, selon laquelle la théorie de la relativité est largement acceptée dès 1910-1911 [227]. Il est alors concevable que personne ne se soucie de soumettre l'expérience de Guye et Lavanchy à une analyse critique suffisante pour montrer que sa précision est moindre que celle annoncée.

227. Brush (1999) ; voir note 113.

Une seconde hypothèse porte sur le "type" d'expérience. En effet, les physiciens disposent depuis le milieu des années 1910 d'une autre catégorie d'expérience allant dans le même sens que celle de Guye et Lavanchy : les expériences de spectroscopie sur la structure fine de l'hydrogène. Selon Pauli, leur précision est encore meilleure.

> "Après les expériences de Bucherer, Hupka et Ratnowsky [228], la formule relativiste semblait être la plus probable, et les résultats plus récents de Neumann (avec un résultat supplémentaire de Schaefer) et de Guye et Lavanchy sont sans ambiguïté en faveur de celle-ci. Cependant, avec la structure fine des raies de l'hydrogène, la théorie des spectres fournit aujourd'hui une méthode beaucoup plus précise pour déterminer la dépendance de la masse de l'électron à la vitesse." [229]

Arthur Schidlof, l'élève de Guye, les place au même niveau :

> "La loi selon laquelle le rapport $\frac{m}{m_0}$ varie avec la vitesse v du mobile a été déterminée avec une très grande précision par MM. C.-E. Guye et C. Lavanchy [...]
>
> Elle a été utilisée aussi par M. A. Sommerfeld pour introduire la "correction de relativité" dans la dynamique du modèle d'atome de Bohr, ce qui a permis de prévoir quantitativement la structure fine des raies spectrales de l'hydrogène et de l'hélium. Ces vérifications s'étendent à un très grand intervalle de vitesses ; la formule [de Lorentz-Einstein] est donc actuellement une des mieux contrôlées de la physique expérimentale entière." [230]

Ainsi, d'un point de vue expérimental, les conclusions de Guye sont corroborées par d'autres expériences. À nouveau, pourquoi alors les remettre en question ?

Ces hypothèses ne nous semblent pas entièrement satisfaisantes. Si, en 1920, leur conclusion est attendue et si le débat n'est effectivement pas aussi vif que dans les années 1906-1910, les lettres d'Einstein du 18 avril 1922 et de Starke du 29 décembre 1922 montrent qu'elles sont analysées et jugées de façon très favorable. La question de leur réception est alors plutôt de comprendre pourquoi *ces* expériences sont considérées comme preuve. Autrement dit, la question de leur réception ne se

228. Pauli fait ici référence à la thèse de Ratnowsky publiée en 1911.
229. Pauli (1958, p. 83) : "After the experiments by Bucherer, Hupka, and Ratnowsky the relativistic formula seemed the more likely one, and the more recent results by Neumann (and a supplementary result by Schaefer) and Guye and Lavanchy are quiteun [sic] ambiguously in favour of the latter. The theory of spectra however gives us today, with the fine structure of the hydrogen lines, a much more accurate means for determining the velocity dependence of the electron mass". Cette citation est tirée de la traduction anglaise de l'article de Pauli *Relativitätstheorie* paru en 1921 dans "Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften", vol. V19.
230. Schidlof (1922, p. 341).

pose peut-être pas tant du point de vue de la réponse qu'elles apportent que de celui de leur réalisation. Il apparaît dès lors nécessaire de se pencher plus avant sur l'expérience proprement dite afin de mettre à jour les raisons possibles de leur renommée.

Avant cette étude que nous présentons dans les parties 3 et 4 de ce travail, intéressons-nous à Guye, ce physicien encore largement méconnu.

2

Charles-Eugène Guye (1866-1942).

Sommaire

Introduction **91**

2.1 Le début de carrière de Guye **95**

2.1.1 Premiers travaux à Genève (1887-1891) puis à Zürich (1891-1900) 95

2.1.2 Le retour improbable de Guye à Genève 97

2.1.2.1 La démission de Soret 97

2.1.2.2 L'affaire Pierre Curie 98

2.1.2.3 L'appel à Guye 101

2.1.3 Les débuts difficiles de Guye (1900-1903) 104

2.2 L'activité scientifique au laboratoire de Guye **109**

2.2.1 Développement du laboratoire 109

2.2.2 Vue d'ensemble de l'œuvre scientifique de Guye 109

2.2.3 Guye, directeur de recherche au Laboratoire de physique . . 112

2.3 Comment situer les expériences sur l'inertie des électrons parmi les travaux scientifiques de Guye ? **119**

2.3.1 Guye et la question de l'inertie de l'électron 120

2.3.1.1 Conférences sur la “constitution électrique de la matière” en 1904 120
2.3.1.2 La charge spécifique l’électron — 1906 124
2.3.1.3 Guye et l’inertie entre mai 1906 et 1907 129
2.3.1.4 Étudier l’inertie des électrons au laboratoire de Guye en 1907 131
2.3.2 Retombées des recherches sur l’inertie des électrons pour Guye et son laboratoire 136
2.3.2.1 La place de Guye en Suisse 136
2.3.2.2 Doctorat *honoris causa* de la faculté des sciences de Paris — 1926 137
2.3.2.3 Guye, Correspondant pour la section de physique générale à l’Académie des sciences de Paris 138
2.3.2.4 Autres institutions hors de la Suisse 139
Conclusion 141

> "*J'ai donc eu, s'il est permis de s'exprimer ainsi, un pied dans l'ancienne et un pied dans la nouvelle physique, ayant été bien souvent le témoin des discussions, hésitations, controverses, parfois passionnées, qui ont marqué cette prodigieuse évolution.*" [1]

Introduction

Charles-Eugène Guye est né le 15 octobre 1866 dans le domaine familial de Saint-Christophe, près d'Yverdon dans le canton de Vaud en Suisse. Son père, Philippe Guye (1829-1894) [2], était maître horloger [3], marié à Élise Besançon (1835-1914) [4]. Selon l'un de ses derniers élèves et collaborateurs, Hugo Saini, les parents de Charles-Eugène décidèrent de s'installer "de bonne heure [...] à Genève afin de permettre à [leurs] trois fils de faire des études supérieures" [5]. L'aîné, Philippe-Auguste (1862-1922), eut une carrière de premier plan en tant que professeur ordinaire de chimie théorique et technique à l'Université de Genève. Il fonda en 1903 le *Journal de chimie physique* et en fut l'éditeur jusqu'à son décès. Le cadet, Francis (1864-1938) [6], était peintre. Comme lui, Charles-Eugène ne fut pas marié. Seul Philippe-Auguste, marié à Cécile Arrès (1868-1952) [7], eut trois enfants.

C. E. Guye accomplit la totalité de ses études à Genève. Après 9 années à l'École polytechnique de Zürich entre 1891 et 1900, il y revient, appelé au poste de professeur ordinaire de physique. Il occupera ce poste pendant trente ans, démissionnant pour raisons de santé. Il décède le 15 juillet 1942 à Genève. Le lendemain, dans le *Journal de Genève* Émile Guyénot s'exprime en ces termes :

> "La science genevoise est en deuil ; le professeur Charles-Eugène Guye, qui illustra pendant de nombreuses années la chaire de physique expérimentale [8] de notre Université, vient de s'éteindre à l'âge de 75 ans."

Dans cet hommage, Guyénot, professeur ordinaire de zoologie et d'anatomie comparée à l'Université de Genève, insiste principalement sur l'intérêt que portait

1. Propos rapportés par Weiglé (1943, p. 57) et datés selon l'auteur du 9 novembre 1939.
2. *Journal de Genève*, le 24 juillet 1894.
3. Speziali (1997, p. 277).
4. *Journal de Genève*, le 3 septembre 1914.
5. Saini (1943).
6. *Journal de Genève*, le 10 août 1938.
7. *Journal de Genève*, le 30 décembre 1952.
8. Guye fut en réalité titulaire de la chaire de physique. Ce n'est que suite à sa démission que cette chaire est divisée en une chaire de physique mathématique et une chaire de physique expérimentale (Conseil d'état, le 28 mars 1930).

Guye à la biologie et à la philosophie. Plus tard, J. J. Weiglé, titulaire de la chaire de physique expérimentale, rappellera que

> "[l]e chef-d'œuvre expérimental de Guye est sans contredit sa mesure de la variation de la masse avec la vitesse des électrons. En vérifiant comme il le fit la théorie d'Einstein, il contribua à changer totalement notre point de vue sur la mécanique." [9]

À l'extérieur de la Suisse, Louis de Broglie prononce l'éloge de Guye devant l'Académie des sciences :

> "Mais les travaux les plus célèbres accomplis par Guye, ceux qui ont établi solidement sa réputation d'habile expérimentateur parmi les physiciens du monde entier, sont ceux qu'il a consacrés à la vérification expérimentale de la loi proposée par H. A. Lorentz en accord avec le principe de Relativité pour représenter la variation de la masse de l'électron en fonction de sa vitesse.
>
> [...] elles [ces expériences] ont assuré à Guye une place des plus distinguées parmi les physiciens de notre temps " [10]

Comme nous l'avons montré, la réception des expériences de Guye pose question. Nous avons évoqué à la fin de la partie précédente l'hypothèse selon laquelle leur réalisation plutôt que leur conclusion est responsable de la renommée qu'elles acquièrent dès les années 1920. Qu'en est-il de la réputation de leur réalisateur et de la physique genevoise ? Dans quelle mesure cela joue-t-il sur leur accueil ?

L'œuvre scientifique de Guye n'a jusqu'à présent fait l'objet que de deux publications historiques. La première est réalisée par Pierre Speziali dans son ouvrage sur *la vie et l'œuvre de 33 physiciens genevois* [11]. Ce travail, référence incontournable pour qui veut "prendre contact" avec Guye, ne constitue toutefois qu'une ébauche partielle d'une biographie de Guye. La seconde, moins détaillée, est l'article dans le *Dictionary of scientific biographies* rédigé par Lloyd Swenson [12].

Le nom de Guye apparaît également dans quelques articles sur l'histoire de la théorie de la relativité, à côté de ceux de Kaufmann, Bucherer et Neumann. Les références sont toujours succinctes [13]. Elles peuvent être erronées [14]. Certaines présentent le travail de Guye dans la continuité des expériences de Kaufmann puis de

9. Weiglé (1943, p. 65).
10. de Broglie (1942, p. 210-211).
11. Speziali (1997).
12. Swenson (1972).
13. Voir Brush (1999, p. 186) et Whittaker (1987, note 3, p. 53).
14. Voir Jammer (1997, p. 167) qui date les travaux de Guye et Lavanchy de 1921.

Bucherer [15]. Nous montrerons plus précisément dans la partie suivante en quoi cette vision constitue un raccourci historique.

En plus de ces études historiques, nous avons également étudié les articles écrits à sa mort par Weiglé [16], Briner [17] et de Broglie [18]. Ceux-ci ne bénéficient pas du recul historique et constituent plutôt des "mémoires" (Weiglé et Briner) ou un éloge (de Broglie).

Comment situer Guye parmi ses contemporains avant 1920 ? Pourquoi se lance-t-il dans cette recherche en 1907 ? Quels savoir-faire possède-t-il initialement ? Quel est le rayonnement du laboratoire de physique de l'Université de Genève ? Les réponses à ces questions permettront de mieux envisager dans quelle mesure des critères "sociaux" interviennent dans la réception de l'expérience de Guye et Lavanchy. Mais les quelques références mentionnées précédemment sont largement insuffisantes. Nous proposons donc ici un complément aux études existantes, plus détaillé, selon les axes que nous venons d'esquisser.

Ce travail s'appuie sur différentes sources. Nous avons tout d'abord recensé les différentes publications de Guye, aidé en cela par la liste établie par Weiglé en 1943 [19]. Cette bibliographie comporte toutefois des erreurs typographiques que nous avons corrigées [20] et dont nous donnons une nouvelle version dans l'annexe A de ce travail. L'étude d'une grande partie de ces publications nous a permis de retracer la carrière scientifique de Guye entre 1900 et 1930.

Les Procès Verbaux des séances du conseil de la Faculté des sciences de l'Université de Genève ont constitué une source permettant de documenter en partie la carrière du professeur Charles-Eugène Guye. Elles sont conservées au Dépôt des bibliothèques universitaires à Genève. Nous avons consulté principalement les volumes 1984/22/81 et 1984/22/82.

Une source particulièrement riche et complémentaire de la précédente est constituée par les documents conservés aux archives d'état de Genève. Nous avons consulté les cartons suivants dans les archives du Département de l'instruction publique :

1. 1985 va 5.3.4, Organisation 4, 1900-1909

15. Voir Tonnelat (1971, p. 106) et Swenson (1979, p. 181).
16. Weiglé (1943) et Weigle (1943).
17. Briner (1943).
18. de Broglie (1942).
19. Weiglé (1943, p. 66-79).
20. Au moins partiellement.

2. 1985 va 5.3.20, Université 1, 1900-1909
3. 1985 va 5.3.25, Université 6, 1900-1909
4. 1985 va 5.3.26, Université 7, 1900-1909
5. 1985 va 5.3.30, Université 1, 1910
6. 1985 va 5.3.36, Université 1, 1911
7. 1985 va 5.3.43, Université 1, 1912
8. 1985 va 5.3.44, Université 2, 1912
9. 1985 va 5.3.51, Université 1, 1913
10. 1985 va 5.3.52, Université 2, 1913
11. 1985 va 5.3.61, Université 1, 1914
12. 1985 va 5.3.62, Université 2, 1914
13. 1985 va 5.3.190, Université 2, 1926
14. 1985 va 5.3.258, Université 4, 1930

Les archives personnelles de Guye sont conservées au Musée d'histoire des sciences de Genève. Elles ont été données par la petite-fille de Philippe-Auguste, Ariane Martin-Coppens (1915-2003) [21] le 3 avril 1987, comme l'atteste le répertoire des documents conservés à la bibliothèque du Musée. Elles sont constituées de lettres et de cartes postales de physiciens européens, de notes rédigées par Guye, de ses diplômes et de divers actes de nominations.

Nous avons également consulté le dossier Guye conservé aux Archives de l'Académie des sciences de Paris. Outre les éléments factuels sur les travaux de Guye et ses publications dans les *Comptes rendus*, ce dossier contient des informations sur les conditions de son élection en tant que correspondant de la section de physique générale.

Les archives en ligne du *Journal de Genève* [22] permettent de retrouver de façon relativement aisée des informations biographiques sur Guye et sa famille, ainsi que sur différents personnages qui apparaissent au long de sa vie. On peut également y trouver des résumés des séances du conseil d'état concernant l'organisation de l'Université.

Enfin, le département de physique de la faculté des sciences de l'Université de Genève conserve des catalogues du cabinet de physique intitulés *Cabinet de physique, instruments, répertoires et registre d'entrée.*

21. Voir *Journal de Genève*, le 30 décembre 1952.
22. Voir le site http://www.letempsarchives.org.

2.1 Le début de carrière de Guye

2.1.1 Premiers travaux à Genève (1887-1891) puis à Zürich (1891-1900)

La carrière de Guye à l'Université de Genève commence dès 1887. Il choisit d'étudier la physique. Il prépare une thèse sous la direction du professeur ordinaire de physique Charles Soret (1854-1904) [23].

Ce dernier est appelé en 1879 à l'Université pour occuper la chaire de minéralogie suite à la démission de Galissard de Marignac. Il doit alors s'occuper de construire des enseignements et d'organiser un laboratoire *ex-nihilo* car la minéralogie vient de devenir indépendante de la chimie. Les installations qu'il met en place servent aux manipulations chimiques, aux mesures optiques et aux déterminations cristallographiques. Il y parvient peu à peu et mène des recherches en thermodiffusion [24]. En 1887, Soret est nommé professeur ordinaire de physique suite au décès d'Elie Wartmann l'année précédente. Là encore, il imprime sa touche en réorganisant les travaux pratiques en deux niveaux, le premier pour les débutants, le second pour les étudiants plus avancés préparant une thèse de doctorat. Soret s'occupe en particulier de l'enseignement de physique expérimentale et d'optique. Les enseignements de physique générale sur la chaleur et l'électricité sont quant à eux assurés par le professeur extraordinaire Albert-Auguste Rilliet (1848-1904). Celui-ci est alors considéré comme l'un des meilleurs spécialistes dans le domaine des mesures électriques et donne de plus un "cours spécial" avec "exercices pratiques" sur ce sujet [25].

C'st dans cet environnement que Guye prépare et soutient sa thèse de doctorat en 1889, sur un sujet d'optique : "Sur la polarisation rotatoire du chlorate de soude cristallisé" [26]. Il est le premier étudiant de Soret à soutenir une thèse, et semble avoir tissé des liens amicaux avec son professeur grâce à qui il continuera de travailler en tant que *privat-docent* au laboratoire de physique après 1889 et son échec à obtenir une place d'enseignant au Collège. De même, durant les années que Guye passe à Zurich, il continue d'écrire "régulièrement" [27] à son professeur et le tient informé de ses travaux.

23. Les informations qui suivent sont tirées de Speziali (1997).
24. Il étudie le phénomène de séparation des constituants d'un mélange sous l'effet d'une hétérogénéité de température, effet qui porte aujourd'hui son nom.
25. Borgeaud et Martin (1934a, p. 207-209).
26. Guye (1889b) et Guye (1889c) pour un exposé de ses résultats, et Guye (1889a) pour le Mémoire complet.
27. Speziali (1997, p. 278).

Après sa thèse, il continue ses recherches d'optique dans le laboratoire de Soret sur la polarisation du quartz aux basses températures. Celles-ci donnent lieu à trois publications co-signées entre 1892 et 1893 [28]. En même temps, il s'intéresse à des sujets d'électricité et plus particulièrement à l'étude d'appareils de mesure. En 1890 et 1892 il publie deux articles sur le bolomètre [29] dans les *Archives des Sciences Physiques et Naturelles* [30].

Guye part en 1891 à l'École polytechnique fédérale de Zürich comme assistant du professeur Heinrich Weber (1843-1912) pendant trois semestres [31]. Il s'intéresse alors à l'électricité théorique et appliquée, domaine dont il fera sa spécialité future. Afin de parfaire sa formation, il suit le programme de travail conseillé par Weber : travail de laboratoire, étude des mathématiques, étude de la langue allemande [32]. En 1894, il est nommé professeur agrégé à l'École polytechnique fédérale [33]. Durant tout son séjour à Zürich, il donne des cours comme *privat-docent*, l'été, en électricité. Durant l'année 1899, il est en charge d'un laboratoire à titre de remplacement [34].

À Zürich, Guye travaille essentiellement sur les courants polyphasés et les phénomènes d'induction dans les lignes électriques. Dans ses recherches, il associe la théorie électromagnétique aux considérations expérimentales, devenant ainsi le premier à introduire en Suisse les méthodes vectorielles basées sur la représentation de Fresnel pour l'étude des courants alternatifs [35].

Entre 1893 et 1900, il publie 21 articles, principalement dans les *Archives* mais aussi dans la revue *l'Éclairage électrique* et dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*. Son travail "Sur la moyenne distance géométrique de tous les éléments d'un ensemble de surfaces et son application au calcul des coefficients d'induction" [36] lui fait remporter en 1894 le Prix Davy de l'Université de Genève. Il continue toujours à s'intéresser aux appareils de mesures électriques, en particulier pour la mesure des puissances.

28. Soret et Guye (1892a), Soret et Guye (1892b) et Soret et Guye (1892c).
29. Le bolomètre est un instrument de mesure mis au point dans les années 1880 permettant de mesurer de très petites différences de températures par la variation de résistances électriques.
30. Guye (1890) et Guye (1892).
31. 'Séance de la commission chargée de donner un préavis sur la vocation de M. Guye, Ch.Eug. à la chaire de physique', le 2 novembre 1900. Archives du DIP, carton 1985 va 5.3.26.
32. Lettre Guye à Soret datée du 26 avril 1891, citée par Speziali (1997, p. 278).
33. Voir le 'Curiculum' [sic] dans le dossier Guye des archives de l'Académie des sciences.
34. 'Séance de commission chargée de donner un préavis sur la vocation de M. Guye, Ch.Eug. à la chaire de physique', le 2 novembre 1900. Archives du DIP, carton 1985 va 5.3.26.
35. Weigle (1943, p. 314).
36. Guye (1894).

En plus d'une solide formation en électricité, les années passées à Zürich lui donnent l'occasion de se faire remarquer par ses pairs pour sa capacité à allier physique mathématique et physique expérimentale, ses compétences dans le domaine de l'électricité théorique et appliquée, ainsi que pour la qualité de ses exposés à la Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève (SPHN) [37].

2.1.2 Le retour improbable de Guye à Genève

2.1.2.1 La démission de Soret

Après 13 années passées à la chaire de physique de l'Université, Charles Soret envoie en mai 1900 sa démission pour raisons de santé au doyen de la Faculté des sciences Robert Chodat (1865-1934). La première réaction de celui-ci est de chercher à convaincre Soret de revenir sur sa décision, avec l'appui de toutes les instances en charge de ces dossiers. Ces démarches n'aboutissent pas. Le 6 juin, il l'annonce au conseiller d'état chargé du *Département de l'instruction publique* (DIP), Georges Favon (1843-1902). Le conseil de la Faculté se trouve alors dans l'obligation de lui trouver un remplaçant pour l'année universitaire à venir [38].

En décembre 1899, François Dussaud (1870-1953) écrit à Favon afin de lui proposer ses services pour donner un cours de mécanique et de physique industrielle [39]. Suite à un préavis négatif du Sénat, Dussaud récrit à Favon en février 1900 afin de lui redemander son appui personnel. N'ayant pas reçu de réponse, il lui écrit à nouveau le 20 mai. Il apprend ensuite la démission de Soret et demande officiellement le 8 juin à le remplacer à la chaire de physique. Cette demande n'aboutit pas. En fait, depuis la démission de Soret, le conseil de la Faculté représenté par Chodat et Louis Duparc (1866-1932) avait commencé à approcher Pierre Curie (1859-1906) afin de lui proposer le poste vacant [40].

37. 'Séance de commission chargée de donner un préavis sur la vocation de M. Guye, Ch.Eug. à la chaire de physique', le 2 novembre 1900. Archives du DIP, carton 1985 va 5.3.26.
38. Archives du DIP, carton 1985 va 5.3.26.
39. Archives du DIP, carton 1985 va 5.3.25.
40. Le récit qui suit est basé sur les documents conservés aux archives du DIP dans le carton 1985 va 5.3.26 Université 7. Nous reproduisons dans l'Annexe B les lettres et télégrammes dont nous citons les extraits par la suite.

2.1.2.2 L'affaire Pierre Curie

La première proposition de l'Université de Genève est accueillie par Curie avec gratitude, mais il décide dans un premier temps de la refuser. Dans sa lettre du 2 mai 1900 à Chodat, il affirme tenir à l'enseignement qu'il dispense à l'Ecole de physique et de chimie et dont le directeur souhaite le garder. Il avoue ne pas savoir s'il sera en mesure de prendre la suite de Soret ; avec des responsabilités d'enseignement et de directeur du laboratoire, tout en poursuivant ses recherches.

Durant le mois de mai 1900, le doyen de la Faculté des sciences insiste pour le persuader de venir à Genève. Les démarches de Chodat seront couronnées de succès puisque Curie lui fait savoir par un télégramme en date du 11 juin 1900 qu'il accepte finalement. Il confirme son choix auprès du président du DIP par télégramme une semaine après. Chodat rend compte des "pourparlers assez longs" qu'il a menés auprès de Curie. Ce dernier a posé des conditions que le doyen justifie d'accepter du fait de la valeur du physicien français.

> "L'avenir de notre haute école dépend en grande partie, sinon exclusivement, du choix que le gouvernement fera des professeurs. Il s'agit que les chaires maîtresses soient occupées par des hommes de première valeur." [41]

Les conditions posées par Curie sont les suivantes. Tout d'abord, il veut voir accorder à sa femme la possibilité de donner un cours de mathématiques ou de physique à l'Université en qualité de privat-docent. Il demande ensuite un préparateur personnel pour ses recherches, un traitement annuel de 8000 francs [42], la prise en charge de ses frais de déménagement et l'augmentation éventuelle des crédits du laboratoire. Toutes ces conditions sont soutenues par Chodat et Duparc qui ajoutent même qu'il faudrait créer deux postes d'assistants en physique pour Curie, alors même que son prédécesseur n'en avait aucun. Ainsi, l'Université est prête à beaucoup afin de recruter un professeur de renom.

Mais la décision de Curie ne semble pas si ferme qu'il le laissait entendre puisque, le 10 juillet, il écrit à Chodat qu'il attend l'avis de son beau-frère médecin en Pologne quant à la santé de sa femme qu'il a peur de voir inadaptée au climat genevois. Il exprime à nouveau son appréhension face à la tâche qu'il aura à accomplir à Genève, et demande de plus amples renseignements sur les instruments dont est doté le laboratoire de physique.

41. Lettre de Chodat à Favon, le 20 juin 1900.
42. Le traitement des professeurs ordinaires de la Faculté des Sciences s'élevait alors à 6000 francs.

Le 16 juillet, la commission de la Faculté des sciences chargée de se prononcer sur l'appel à Curie se déclare unanimement favorable à sa nomination, envisagée comme l'occasion à ne pas manquer d'avoir un professeur de renom à l'Université et ainsi d'améliorer son rayonnement international. Le secrétaire, Charles Seitz (1860-1930), s'élève toutefois contre la procédure d'appel qui n'a pas permis d'auditionner des candidats locaux. Sans doute est-ce lui qui s'est abstenu de participer au vote. Le préavis de la commission est transmis le jour même par le recteur Ernest Martin (1849-1910) au président du DIP.

Le lendemain, Chodat écrit à Favon que Curie a finalement changé d'avis. En effet, dans une lettre écrite le 15 juillet, ce dernier écrit au doyen que "la difficulté qu'il y aurait pour [lui et sa femme] de poursuivre les travaux en cours et le traitement du radium"[43] les ont fait changer d'avis et décider de rester à Paris. Favon répond à Curie le 17 juillet. Il lui exprime son "chagrin" et laisse néanmoins la porte ouverte à un nouveau revirement du Français, tout en lui assurant qu'il est prêt à faciliter ses travaux le cas échéant. Le lendemain, Curie revient à nouveau sur sa décision et le fait savoir à Chodat. La lettre de Favon l'a touché et son beau-frère l'a rassuré sur le climat genevois. Il rappelle toutefois la difficulté qu'il a eu à prendre cette décision et exprime l'envie de pouvoir à l'occasion faire venir son collaborateur André Debierne (1874-1949) à Genève.

Le 20 juillet, le Conseil d'état nomme officiellement Pierre Curie professeur ordinaire de physique à la Faculté des Sciences de l'Université de Genève. Son traitement annuel sera de 10 000 francs, les frais de changement de résidence seront pris en charge, le crédit alloué au laboratoire sera augmenté d'une somme à convenir avec le nouveau professeur, qui se verra doté de deux assistants, et la collection des instruments sera augmentée. Le 22 juillet, Curie écrit à Chodat pour accuser réception de sa nomination à Genève et décrire la façon dont il envisage d'organiser son enseignement. Il laisse au Doyen le soin de fixer lui-même le montant du crédit ordinaire à allouer au laboratoire ainsi que du crédit d'acquisition et d'installation des nouveaux équipements. Il semble donc avoir finalement accepté l'idée de quitter Paris. Il n'a pourtant toujours pas donné sa démission officielle à l'école de Physique et de Chimie. Il attend en effet la confirmation définitive de sa nomination par le Grand Conseil et voudrait savoir la date officielle de son entrée en fonction afin de fixer celle de son départ de Paris. Il exprime également son souci quant à ses droits à la retraite en France dans le cas de son départ pour Genève, dont il ne sait s'ils

43. Lettre de Curie à Chodat, le 15 juillet 1900.

pourront être maintenus. Le 27, il écrit à Chodat qu'il viendra à Genève pour visiter le laboratoire au début du mois d'août. Le 2 août, il fait un exposé devant la SPHN sur ses recherches sur les métaux radiants [44].

Le 16 août, Chodat reçoit un télégramme de Curie. Ce dernier a finalement décidé de rester à Paris pour se consacrer à ses travaux en cours qu'il estime ne pouvoir abandonner. Deux jours après, dans une nouvelle lettre, il lui annonce qu'il a reçu la confirmation de sa nomination par le Grand Conseil et l'approbation de son allocation de professeur. Il a également eu vent des difficultés rencontrées par Favon et des remous suscités par les conditions particulières de son appel à Genève. Il ajoute qu'il est désormais très hésitant à venir et qu'il regrette d'avoir accepté ce poste. Il met en avant la difficulté de la tâche qui lui sera confiée et réitère ses doutes quant à ses capacités à parvenir à développer l'enseignement de la physique à l'Université. De plus, il se soucie de ne pouvoir retourner en France par la suite. Il insiste cependant pour que les nouveaux crédits alloués au laboratoire soient précisés avant son arrivée. Dans le cas où des difficultés à ce sujet se présenteraient, il l'invite à ne pas hésiter à revenir sur son appel. Le 29 août, dans une lettre à Chodat de la même teneur que la précédente, il avance le nom de Georges Sagnac (1869-1926) comme pouvant prendre le poste à Genève dans le cas où le Conseil d'état ne pourrait tenir ses engagements financiers quant au laboratoire.

Trois semaines plus tard, Curie envoie officiellement sa démission à Favon, jointe dans une lettre à Chodat. Il fait part au Conseiller d'état d'un "physicien éminent, ayant fait des recherches remarquables [...] qui accepterait avec empressement d'aller à Genève" [45]. Dans la lettre à Chodat, il précise les raisons qui le font renoncer finalement à quitter Paris. Il affirme tenir plus à ses recherches en cours sur les "métaux radiants" qu'à la situation qui lui est proposée. De plus, il avance que ne pouvant engager son collaborateur à le suivre, ses travaux seraient fortement compromis. Il ajoute en post-scriptum avoir rencontré le professeur extraordinaire Rilliet et affirme qu'il lui a paru compétent pour le poste de professeur ordinaire.

Le 23 septembre, Chodat fait suivre les courriers de Curie à Favon et lui fait part de son indignation suite à la démission du Français. Dans les jours qui suivent, il envoie un télégramme au démissionnaire qualifiant sa décision de "scandal [sic] moral" [46]. Le 27, Curie envoie à Chodat un télégramme dans lequel il annonce revenir

44. Curie (1900).
45. Peut-être s'agit-il de Sagnac.
46. Télégramme non daté de Chodat à Curie.

sur sa démission "puisqu['il] trouve cela si grave"[47]. Plus tard dans la journée, il apprend par Henri Poincaré et Gaston Darboux (1842-1917) que l'Université de Paris lui propose un poste, une "situation" pour sa femme et qu'il pourrait également conserver ses collaborateurs. Il écrit à Chodat qu'il lui semble ainsi que "le scandale [...] ne se produirait pas"[48].

Le 1er octobre, après trois mois de tergiversations, il envoie sa lettre définitive de démission à Favon et l'informe de la proposition de l'Université de Paris, "la première université de [s]on pays". Favon lui envoie la notification de l'acceptation de sa démission le 5 octobre, non sans lui exprimer son ressentiment.

> "Monsieur le Professeur,
> Ce matin, le Conseil d'Etat a accepté votre
> démission.
> Je n'ai pas à vous juger ; et si vous croyez
> avoir bien agi, c'est parfait.
> Je constate seulement que vous avez rompu
> un engagement formel dans des conditions propres à
> mettre dans l'embarras des hommes qui avaient en
> vous la plus entière confiance.
> Agréez mes salutations empressées."[49]

Speziali a étudié dans de moindres détails cet épisode de l'histoire de la physique à Genève dans son ouvrage sur les physiciens genevois. Il note que si les relations de Curie avec l'Université ont été entachées par l'épisode de l'été 1900, il n'en garde pas moins des relations avec certains de ses membres comme Soret et les frères Guye. Il cite une lettre de Curie à Soret datant de 1902 :

> "Les genevois ont gardé de moi un mauvais souvenir. Cela est naturel et mérité. Aussi suis-je très touché, lorsque je constate que les physiciens genevois ne m'ont pas gardé rancune et je leur en suis très reconnaissant."[50]

2.1.2.3 L'appel à Guye

La décision finale de Curie de ne pas quitter Paris pour prendre le poste laissé vacant par Soret contraint les responsables de la Faculté des sciences et du DIP à

47. Télégramme de Curie à Chodat, le 27 septembre au matin.
48. Lettre de Curie à Chodat, le 27 septembre 1900.
49. Lettre dactylographiée de Favon à Curie, le 5 octobre 1900.
50. Speziali (1997, p. 276).

agir rapidement. Ils n'ont certes pas réussi à donner au département de physique un professeur déjà largement reconnu à travers l'Europe, mais ils ne peuvent laisser vacante la place de professeur titulaire de la chaire de physique, malgré l'aide proposée par Rilliet [51].

Dans une lettre envoyée dans les tous premiers jours d'octobre depuis Paris où il a pris quelques jours de repos après un été fatigant, Chodat suggère à Favon de proposer à Soret de "reprendre provisoirement l'enseignement de la physique" ce qui "permettrait de traiter de cette affaire en toute tranquillité". Nous ne disposons ni de la réponse de Favon ni de celle, éventuelle, de Soret. Cependant, le 6 octobre, Chodat annonce par télégramme à Favon qu'il verra très prochainement Charles-Édouard Guillaume (1861-1938) [52]. Celui-ci, originaire de Fleurier dans le canton de Neuchâtel, travaille alors à Paris, au Bureau international des poids et mesures. Chodat le rencontre et lui propose le poste, sans toutefois l'informer de toutes les conditions proposées préalablement à Curie. Guillaume semble intéressé par la proposition de l'Université. Mais, dans une longue lettre à Chodat datée du 13 octobre, il refuse finalement à cause de ses travaux en cours.

Après ces deux tentatives infructueuses, le DIP revoit sa politique de recrutement pour se tourner vers des candidats établis en Suisse. Son choix se tourne alors vers un physicien qui fait l'unanimité des "personnes compétentes consultées" [53], Charles-Eugène Guye. Le 19 octobre, Chodat propose à Guye de se "charger de l'enseignement de la physique et de la direction du laboratoire dépendant de cet enseignement pour l'année universitaire 1900 - 1901" [54]. Guye accepte ce qui est en fait un poste temporaire. Il affiche toutefois ses ambitions personnelles puisqu'il précise qu'il accepte, "étant entendu, ainsi que vous avez bien voulu me le dire verbalement, que les fonctions temporaires dont je me chargerais seront considérées comme un titre important au moment d'une nomination définitive" [55].

Finalement, c'est un poste définitif qui sera proposé à Guye. Le 2 novembre

51. Dans une lettre du 8 octobre 1900 à Soret, Rilliet propose de se rendre utile pour parer à la démission de Curie : "J'avais dîné il y a une huitaine de jours avec Curie qui m'avait annoncé comme très probable sa détermination. Je pense que je pourrai être utile à quelque chose pendant les prochains mois.", cité par Speziali (1997, p. 244).

52. Prix Nobel de physique en 1920 pour "les services qu'il a rendus à la mesure de précision en physique par la découverte des anomalies dans les alliages fer-nickel".

53. Voir 'Séance de la commission chargée de donner un préavis sur la vocation de M. Guye, Ch.Eug. à la chaire de physique', le 2 novembre 1900. Archives du DIP, carton 1985 va 5.3.26.

54. Nous ne disposons pas de cette lettre mais seulement de la réponse de Guye, le 22 octobre 1900. Elle se trouve aux archives du DIP, carton 1985 va 5.3.26.

55. Lettre de Guye à Chodat, le 22 octobre 1900.

1900, le conseil de la Faculté des sciences se réunit pour donner son "préavis sur la vocation de Guye à la chaire de physique". Le frère de Guye, Philippe-Auguste, qui était membre de la commission chargée de se prononcer sur Curie n'est pas présent lors de cette séance.

Après un compte rendu de la carrière de Guye, Soret s'exprime en faveur de son ancien élève. Il affirme d'une part s'être fait une bonne opinion de celui-ci lors de sa thèse. D'autre part, il mentionne l'avis d'Eduard Hagenbach-Bischoff (1833-1910), professeur à Bâle, qui a travaillé sur des questions d'électricité relatives aux lignes télégraphiques et à l'induction unipolaire, et connaît donc les travaux de Guye. Selon Soret, il estime Guye qui est "très avantageusement connu de la Suisse allemande". Soret ajoute que Guye est le physicien dont le nombre de publications de valeur en Suisse est le plus important après Guillaume, et que les retours de Zürich sur son enseignement sont favorables. À la suite de Soret, Duparc affirme avoir reçu de plusieurs membres du Conseil de l'École Polytechnique de Zürich un avis très positif sur Guye. Enfin, Édouard Sarasin (1843-1917), lui aussi physicien, émet un avis favorable sur Guye en soulignant "la clarté de son exposition" ainsi que ses compétences en mathématiques qu'il sait allier à la physique.

Mais ce dernier soulève à nouveau un débat quant à la procédure d'appel, comme cela avait été le cas pour Curie. Sans remettre en cause la validité des raisons de l'appel dans ce cas précis, il souligne que cette procédure devrait rester exceptionnelle. C'est alors que Chodat intervient pour rappeler les conditions dans lesquelles Guye a été appelé au poste de professeur de physique, tout en soulignant que des consultations ont été menées afin de se renseigner sur les personnes potentiellement aptes à se voir appeler. Il conclut en notant que Guye a reçu l'approbation unanime des consultants.

Le débat sur la procédure d'appel se poursuit. Seitz, le secrétaire, affirme qu'il se prononcera contre l'appel, tout en précisant que ce n'est pas un vote contre la personne de Guye. Finalement, le préavis sur l'appel de Guye sera adopté par huit voix contre deux.

Le 10 novembre, le Conseil d'état publie l'arrêté de nomination de Guye au poste de professeur de physique. Favon envoie cet arrêté le jour même par courrier. Guye répond le 14 novembre dans une lettre manuscrite :

> "Monsieur le Président,
> J'ai l'honneur de vous accuser réception de votre lettre datée du 10 novembre, m'annonçant ma nomination à la chaire de Physique à l'Université de Genève.

> En vous exprimant tous mes remerciements pour la confiance dont le Conseil d'Etat a bien voulu m'honorer, il me tient à cœur de vous dire que toute mon activité et tous mes efforts tendront à la mériter et que le Département de l'Instruction Publique peut compter sur mon entier dévouement." [56]

2.1.3 Les débuts difficiles de Guye (1900-1903)

Malgré les moyens financiers et matériels spécialement consacrés à sa venue à Genève, Curie refuse de quitter Paris. Si certains ont interprété cela comme le signe du poids de l'avis de Marie Curie sur la décision de son mari [57], nous sommes tentés d'y voir également une conséquence de l'état de la physique à Genève à la fin du XIX^{e} siècle.

En effet, Soret s'occupait principalement d'optique. La thématique la plus en vogue à l'époque, spécialité de Guye, l'électricité, était à la charge du professeur extraordinaire Rilliet qui fournissait lui-même la plupart des instruments et appareils nécessaires à ces études. Guye se plaint d'ailleurs officiellement de l'état du laboratoire dans ce domaine. Dans une lettre à Favon datée du 18 avril 1902, il écrit :

> "En outre, pour parer aux besoins les plus pressants, j'ai dû faire construire dans le laboratoire même ou aux constructeurs les appareils et les instruments les plus indispensables. Ces acquisitions étaient d'autant plus urgentes que le crédit (de 10 000 frs si je ne me trompe, dont il avait été question lors de la nomination de M. Curie) n'a pas été maintenu et que d'autre part M. le prof. Rilliet renonçant à s'occuper des laboratoires, tous les instruments qui étaient sa propriété personnelle ont été retirés de ce fait." [58]

C'est donc avec raison que Curie, qui avait visité le laboratoire de physique à Genève début août 1900, pouvait s'interroger sur les conditions dans lesquelles il aurait pu poursuivre ses recherches sur la radioactivité.

Suite au décès de Favon, Guye doit renouveler sa demande de crédit au nouveau conseiller du DIP. Dans une lettre du 4 novembre 1902, il rappelle ainsi la situation du laboratoire :

> "La nécessité de compléter la collection des instruments de mesures électriques avait déjà alors été reconnue [lors de l'appel de Curie] et l'on ne peut que

56. Lettre de Guye à Favon, le 14 novembre 1900.
57. Ainsi que le fait Françoise Giroud (1981). Cette thèse est reprise par Speziali (1997).
58. Voir lettre du 18 avril 1902 de Guye à Favon, archives du DIP, carton 1985 va 5.3.26. Cette lettre est reproduite à l'annexe B.

> regretter que ce crédit n'ait pas été maintenu lors de la démission de Monsieur Curie.
>
> En outre, il n'est pas inutile de rappeler que M. le prof. Ch. Soret, mon prédécesseur, s'occupait plus particulièrement de recherches d'optique. Les acquisitions en instruments étaient donc tout naturellement faites plutôt dans cette direction et ce mode de faire était d'autant plus justifié que M. le prof. Rilliet, ami personnel de M. Soret, mettait à sa disposition sa collection d'instruments de mesures électriques, d'une valeur de 18000 à 20000 francs.
>
> Aujourd'hui cette situation a cessé, de sorte que le laboratoire se trouve actuellement très pauvre en appareils et instruments d'électricité." [59]

Pour faire face à ces difficultés, Guye utilise tous les moyens dont il dispose. Il avance personnellement l'argent nécessaire à l'achat du matériel indispensable et finance la construction des instruments pouvant être réalisés par son aide de laboratoire, Alexandre Matras [60].

À un manque de crédits et d'instruments d'électricité vient de plus s'ajouter un accroissement du nombre d'étudiants fréquentant le laboratoire. Dès son arrivée, Guye a procédé à une réorganisation des laboratoires de physique. Dans une lettre à Favon le 18 mars 1901, il explique cette organisation :

> "L'organisation des laboratoires comprend de fait trois degrés.
>
> Le degré inférieur (manipulations et exercices sur l'ensemble de la physique) (hebdomadaire)
>
> Le degré moyen comprend un ensemble de travaux plus délicats et plus complets. Il est destiné aux étudiants qui désirent se perfectionner ou voulant se préparer aux travaux de recherches personnelles.
>
> Enfin le degré supérieur pour les étudiants les plus avancés qui préparent leur thèse de doctorat ou effectuent des travaux originaux.
>
> Je crois bien faire d'ajouter que dans un avenir très prochain, le degré moyen comprendra une subdivision consacrée spécialement à l'étude de l'électricité appliquée et de ses méthodes." [61]

59. Voir lettre du 4 novembre 1902 de Guye à Vincent, archives du DIP, carton 1985 va 5.3.26. Cette lettre est reproduite à l'annexe B.

60. En poste depuis le 10 janvier 1901, Alexandre Matras commence par remplacer l'aide précédent en congé pour raisons de santé. Guye utilise son expérience dans la "serrurerie artistique" pour réaliser un certain nombre d'instruments. Matras occupera ce poste jusqu'au mois de juin 1933. Voir lettres de Guye à Vincent le 26 mai 1902 et le 20 juin 1903, archives du DIP, carton 1985 va 5.3.26 ; voir également Conseil d'état, le 27 juin 1933.

61. Voir lettre du 18 mars 1901 de Guye à Favon, archives du DIP, carton 1985 va 5.3.26. Cette lettre est reproduite à l'annexe B.

Selon lui, cette nouvelle organisation a eut pour effet d'augmenter le nombre d'étudiants :

> "Depuis la réorganisation des travaux pratiques, le nombre des étudiants qui suivent les laboratoires a considérablement augmenté ; de 18 qu'il était au semestre d'hiver 1900-1901, il s'est élevé à 57 au semestre d'hiver 1901-1902. En outre une dizaine d'étudiants suivent le laboratoire du 2^n [sic] degré ou se livrent à des travaux de recherches." [62]

Pour l'aider à développer le laboratoire et particulièrement à mettre en place un domaine d'étude – l'électricité – délaissé, Guye dispose d'un assistant personnel en la personne d'Alexandre Fornaro. Celui-ci est officiellement nommé le 20 septembre 1901 [63], mais il est en fait présent aux côtés de Guye dès les premiers mois de cette même année [64]. Dans la même lettre du 18 mars 1901 que Guye écrit à Favon, il décrit brièvement la fonction d'assistant :

> "Le personnel actuel des laboratoires comprend un assistant ; un préparateur mécanicien et un aide.
>
> Il n'y a pas d'auxiliaire avec le titre de "Chefs des travaux" – Les travaux de recherches sont d'ailleurs sous la direction immédiate du professeur.
>
> L'assistant a pour tâche principale de seconder le professeur dans ses recherches personnelles mais surtout dans la direction des exercices et travaux pratiques." [65]

En 1901, Guye envisage donc son assistant comme un second, principalement en charge de l'enseignement pratique. Cela lui permet ainsi de se concentrer sur ses recherches personnelles d'une part, mais également dans ce cas précis d'œuvrer à la rénovation de l'enseignement et du laboratoire.

Notons enfin que Guye n'assure pas seul les fonctions d'enseignement qui sont également confiées à des professeurs extraordinaires ou des privat-docent.

Malgré les difficultés auxquelles Guye est confronté au cours de ses premières années à la tête du laboratoire de physique, il poursuit ses recherches dans le domaine de l'électricité et se lance dans un travail nouveau pour lui sur l'élasticité des solides.

La première thèse effectuée sous sa direction est celle d'Alphonse Bernoud en 1903 sur la mesure de la puissance de courants alternatifs [66]. Initialement, il travaillait sur

62. Voir lettre du 18 avril 1902 de Guye à Favon, archives du DIP, carton 1985 va 5.3.26.
63. Conseil d'état, le 20 septembre 1901.
64. Comme il lui arrivera de le faire par la suite en attendant une nomination officielle, Guye emploie probablement Fornaro sur ses fonds personnels.
65. Voir lettre du 18 mars 1901 de Guye à Favon, archives du DIP, carton 1985 va 5.3.26.
66. Alphonse Bernoud (1874-1969) aura une carrière singulière puisqu'après sa thèse, il exercera

la décharge électrique dans du pétrole comprimé. Mais, le 16 février 1901, un accident survient au cours de l'expérience, le blessant et détruisant le tube à décharge. L'état de santé de Bernoud, d'abord jugé assez grave[67], ne l'empêche pas de commencer de nouvelles recherches. Mais les travaux sur la décharge électrique ne pourront être poursuivis que quelques années plus tard, par Henri Guye[68] en 1905[69]. H. Guye présente sur ce sujet la troisième thèse dont Guye est le responsable[70].

Nous sommes tentés d'interpréter ce délai comme un signe supplémentaire des moyens limités qui ne permettent pas à Guye de poursuivre plus rapidement des recherches sur la décharge électrique. Moins de quatre mois plus tard en revanche, le 6 juin 1901, Guye communique les premiers résultats du nouveau sujet de recherche de Bernoud[71]. Il s'agit d'un travail plus classique, tant par rapport aux recherches menées jusque là par Guye que par rapport aux instruments nécessaires à leur mise en œuvre. Quant aux deux collaborations qui donnent lieu à des thèses présentées dans les universités de Darmstadt et Mulhouse en 1903, réalisées respectivement avec Berthold Monasch et Beni Herzfeld, elles traitent également de sujets d'électricité. La première est une étude de l'arc voltaïque et de l'influence de la nature des électrodes. La seconde est une étude de l'hystérésis dans le fer et de la dissipation d'énergie qui en découle. Le travail de Monasch est mené dans l'air à pression atmosphérique. Dans sa communication de septembre 1902[72], Guye mentionne l'utilisation future d'une "machine pouvant fournir vingt mille volts continus".

Espérait-il avoir cette machine rapidement à disposition ou la possédait-il déjà ? Nous ne pouvons répondre avec certitude à cette question. La seconde publication de Guye et Monasch en 1903 ne fait pas mention d'une telle "machine" et le premier travail effectué au laboratoire avec une machine électrostatique est celui réalisé avec H. Guye[73]. Il s'agit d'une machine Töpler à vingt plateaux de verre[74].

En plus des premiers travaux d'électricité réalisés par Guye et ses étudiants entre

une activité de vulgarisation des sciences avec un grand nombre d'articles publiés au *Journal de Genève*.

67. *Journal de Genève*, le 18 février 1901.
68. Nous n'avons pas trouvé de lien entre ce Guye et Charles-Eugène.
69. Guye présente explicitement ce travail dans la continuité de celui entrepris avec Bernoud en 1901 ; voir Guye et Guye (1905, p. 8).
70. La liste des thèses effectuées au laboratoire de physique se trouve dans Julliard (1909, p. 22-23).
71. Guye et Bernoud (1901).
72. Guye et Monasch (1902, p. 382).
73. Guye et Guye (1905, p. 9).
74. Cette machine est conservée au Musée d'histoire des sciences de Genève. Nous avons travaillé quelques temps dans le but de l'inclure au dispositif expérimental que nous avons reconstruit.

1901 et 1903, l'assistant A. Fornaro effectue une étude de la variation de l'élasticité de l'invar[75] en fonction de la température. C'est la seconde thèse dirigée par Guye.

Nous n'avons pas retrouvé la trace d'un versement de la somme demandée par Guye au Département de l'instruction publique, ni même celle de l'octroi d'un crédit extraordinaire d'un montant inférieur. D'après le *tableau des dépenses concernant les dépenses des laboratoires de l'Université* entre 1897 et 1907[76], le laboratoire fonctionne durant toutes ces années à crédit constant, soit 1500 francs par an[77].

75. L'invar est un alliage fer-nickel remarquable par son faible coefficient de dilatation thermique.
76. Archives du DIP, carton 1985 va 5.3.20.
77. Par comparaison, le salaire annuel de Guye s'élève à 6000 francs.

2.2 L'activité scientifique au laboratoire de Guye

2.2.1 Développement du laboratoire

Par la suite, Guye parviendra à poursuivre et développer les études menées entre 1901 et 1903. Il développera également de nouveaux sujets de recherches. A-t-il reçu le crédit extraordinaire demandé ? Pourvoit-il lui-même aux dépenses liées à ses recherches ? Quoiqu'il en soit, nous n'avons trouvé qu'une nouvelle demande de crédit supplémentaire après la lettre à Vincent du 4 novembre 1902, onze ans plus tard. Il s'agit d'un crédit de 500 francs affecté à l'achat d'une pompe moléculaire dont Guye se sert au cours des expériences sur la variation de l'inertie de l'électron [78].

Il semble ainsi qu'après des débuts difficiles, Guye est parvenu à lancer l'activité et le fonctionnement de son laboratoire dans la direction qu'il souhaite. La fonction d'assistant, qui semble avoir été introduite par Guye avec l'embauche de Fornaro, est pérennisée. Le poste de second assistant sera créé en 1910 pour Aron Tscherniawsky, d'abord sur les fonds propres de Guye [79], puis de façon définitive à partir de septembre 1910 [80]. Par la suite, un troisième poste d'assistant est créé [81].

Au départ de Guye en 1930, la chaire de physique est divisée en deux : une chaire de physique mathématique et une de physique expérimentale à laquelle le laboratoire est rattaché. La création d'une chaire supplémentaire achève le développement, impulsé puis porté par Guye, de la physique à l'Université de Genève entre 1900 et 1930.

2.2.2 Vue d'ensemble de l'œuvre scientifique de Guye

L'étude des travaux scientifiques de Guye permet de dégager plusieurs thématiques de recherche. Une approche chronologique de ces travaux permet de mettre en évidence l'évolution de ses centres d'intérêt. La figure 2.2 propose une représentation de cette chronologie.

L'analyse de cette représentation laisse apparaître trois périodes dans la carrière de Guye à Genève. Entre 1900 et 1905, trois thèmes de recherche sont développés : l'étude de l'arc voltaïque, de l'aimantation et du frottement intérieur des solides.

78. Lettre de Guye à Rosier, le 27 octobre 1913, archives du DIP, carton 1985 va 5.3.52.
79. Lettre de Guye à Rosier, le 2 février 1910, archives du DIP, carton 1985 va 5.3.30.
80. Lettre de Rosier au recteur É douard Montet, le 22 août 1911, archives du DIP, carton 1985 va 5.3.36.
81. Conseil d'état, le 28 septembre 1920.

FIGURE 2.1 – Photographie des membres du laboratoires de Guye durant l'année 1912-1913.

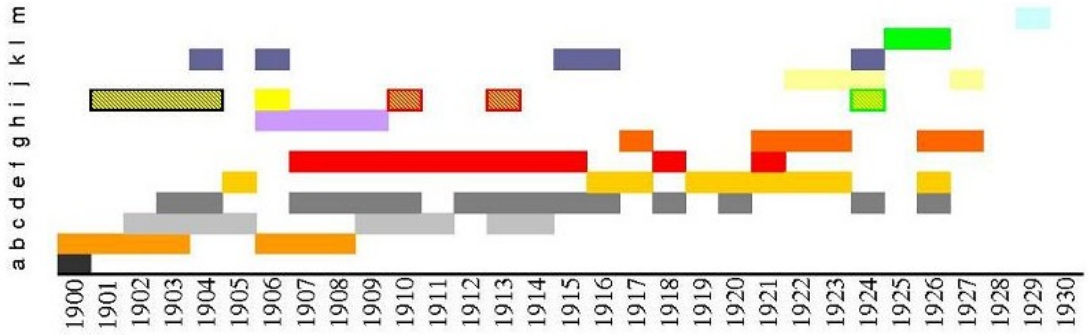

FIGURE 2.2 – Organisation chronologique des travaux scientifiques de Guye entre 1900 et 1930.
a : courants alternatifs
b : arc voltaïque
c : aimantation et hystérésis magnétique
d : frottement intérieur
e : potentiel explosif dans les gaz
f : formule de Lorentz-Einstein
g : rotation électromagnétique de la décharge
h : radioactivité
i : instruments de mesure
j : théorie cinétique
k : théorie électronique
l : ascension de la sève
m : imbibition

La seconde période s'étend de 1905 à 1915. Il poursuit et met fin aux recherches précédentes et aborde de nouveaux sujets : étude de la radioactivité, tentative d'étude du potentiel explosif dans les gaz, approche de la théorie de l'électron et vérification de la formule de Lorentz-Einstein. Enfin, à partir de 1916, il s'intéresse de près au phénomène de la décharge électrique en reprenant l'étude sur le potentiel explosif et en élargissant son étude à la rotation de la décharge électrique sous l'influence d'un champ magnétique. Il se penche également sur de la théorie de l'électron et l'application de la théorie cinétique à l'étude de la décharge électrique.

2.2.3 Guye, directeur de recherche au Laboratoire de physique

Durant les trente années passées à la tête de l'enseignement et de la recherche en physique à l'Université de Genève, Guye effectue près d'une cinquantaine de recherches, seul ou en collaboration avec ses étudiants. Chacun de ces travaux donne lieu à communication dans les *Archives* ou les *Comptes Rendus* de l'Académie des Sciences de Paris, ainsi qu'à la publication d'articles détaillés [82].

Au delà de cette approche globale, nous nous intéressons ici au mode de communication de Guye, dans le but de situer ses recherches sur l'inertie parmi ses différentes thématiques de recherches. Quels sont les invariants et les évolutions dans la communication de Guye ? De ce point de vue, les expériences menées avec Ratnowsky et Lavanchy s'intègrent-elles à ses autres recherches ? Nous retenons pour cette étude les cinq principaux thèmes de recherche élaborés par Guye au cours de sa carrière genevoise : l'arc voltaïque, l'aimantation et l'hystérésis, le frottement intérieur, le potentiel explosif dans les gaz et la rotation électromagnétique de la décharge.

Les travaux sur l'arc voltaïque, menés entre 1902 et 1908, donnent lieu à une conférence devant la *Société Helvétique des Sciences Naturelles* en 1908 [83]. Au cours de celle-ci, Guye ne réalise pas à proprement parler une synthèse des recherches qu'il a dirigées dans son laboratoire, mais propose plutôt de mettre en évidence les intérêts scientifiques et industriels de l'étude de l'arc.

> "Si le fonctionnement de l'arc est encore obscur sur bien des points, comme nous l'avons déjà dit, fort heureusement pour l'industrie, on peut utiliser l'arc sans connaître ce mécanisme ; il suffit de savoir quelles sont les règles à suivre pour l'utiliser : la puissance qu'il consomme, le courant qu'il absorbe, la tension électrique qu'il exige, la chaleur qu'il dégage etc. et ces conditions connues

82. Voir la liste des publications données à l'Annexe A.
83. Annexe A.3, 2.

> par l'expérience permettront aux ingénieurs et aux techniciens de faire de l'arc voltaïque ce puissant auxiliaire dont nous donné la tâche de faire ressortir les nombreux services." [84]

Les travaux réalisés au sein du laboratoire viennent alors appuyer son exposé sur le fonctionnement de l'arc et les conditions de sa stabilité.

Dans cette communication personnelle, Guye laisse entendre le cadre général dans lequel s'inscrit son travail de laboratoire. Dans le cas présent, il s'agit des applications industrielles.

Les recherches sur le frottement intérieur des solides, menées tout au long de sa carrière, sont également à l'origine de publications personnelles [85] et d'une conférence [86] donnée lors de l'Assemblée générale de la *Société française de physique* en avril 1912. Au cours de celle-ci, Guye présente de façon générale le frottement intérieur :

> "[...] *il existe à l'intérieur du fil un ensemble de causes qui ont pour effet d'absorber d'une façon irréversible l'énergie du mouvement lorsque les diverses parties qui composent le solide se déplacent les unes par rapport aux autres.* C'est à cet ensemble de causes que nous donnerons le nom de frottement intérieur." [87]

Il s'applique ensuite à décrire "brièvement" [88] les expériences réalisées depuis quatre années dans son laboratoire sur la variation du frottement intérieur en fonction de la température et à présenter leurs résultats. Enfin, il présente son point de vue sur la nature microscopique du phénomène :

> "Les considérations que nous allons invoquer sont empruntées d'une part, au magnétisme envisagé comme un phénomène d'orientation moléculaire et, d'autre part, à l'hystérésis magnétique, qui est la manifestation irréversible corrélative de ces phénomènes d'orientation." [89]

À nouveau, dans le cadre d'une communication personnelle, Guye intègre de façon explicite ses recherches expérimentales dans un cadre plus général, ici l'étude de la constitution de la matière. Il propose de plus des conceptions théoriques qu'il défend fermement, ce qui constitue une attitude relativement nouvelle pour lui, plus habitué à s'impliquer sur le plan expérimental que théorique.

84. Guye (1911, p. 6).
85. Annexe A.5, 1 et 2.
86. Annexe A.5, 3.
87. Guye (1912, p. 536 ; italiques originales).
88. Guye (1912, p. 540).
89. Guye (1912, p. 556-557).

> "Nous avons par ailleurs la ferme conviction que l'hystérésis magnétique, particulièrement si on étudie ses variations avec la température, c'est-à-dire en fonction de l'agitation thermique, est de nature à nous guider dans le choix des conceptions susceptibles d'expliquer l'amortissement intérieur des solides." [90]

Les deux conférences que nous venons d'évoquer sont l'occasion pour Guye de synthétiser les recherches de ses étudiants afin de présenter à ses pairs les axes de recherche développés dans son laboratoire. Ils sont aussi le lieu privilégié pour Guye où expliciter ses hypothèses de travail et développer sa vision des phénomènes étudiés. Par la suite, de telles considérations deviendront coutumières. Ainsi, suite à la communication du travail mené avec Voïkoff en 1914, Guye formule quelques "remarques générales et personnelles sur la *nature du frottement intérieur des solides* telle que les expériences effectuées jusqu'ici au Laboratoire de physique de l'Université de Genève permettent de l'envisager" [91].

Au cours des recherches sur la décharge électrique, après 1916, Guye se positionne différemment. Cette année là en effet, il propose deux travaux théoriques sur la décharge électrique [92], domaine dans lequel il n'a pas travaillé depuis les expériences de 1905 avec H. Guye. Les idées qu'il développe alors seront le guide théorique des recherches expérimentales qu'il entreprend dès 1917. Il serait intéressant d'étudier dans le détail les hypothèses développées par Guye afin de percevoir leur originalité [93]. Il semble néanmoins que Guye, dont l'intérêt pour ces phénomènes et leur explication remonte au moins à ses premiers travaux sur l'arc voltaïque, adopte une position d'"expert" en ce domaine : il propose des hypothèses théoriques qu'il analyse à partir des expériences qu'il supervise dans son laboratoire, et développe des dispositifs expérimentaux spécifiques.

Pour étayer notre point de vue à ce sujet, notons tout d'abord que parmi les 18 travaux sur les deux sujets — potentiel explosif et rotation électromagnétique — 11 sont des publications personnelles à caractère théorique [94]. Sur les trois premiers thèmes abordés plus haut, on ne comptait que 5 travaux personnels parmi les 23 effectués entre 1902 et 1916.

Un autre élément notable concerne les objectifs de recherche de Guye. Ainsi, les

90. Guye (1912, p. 557).
91. Guye et Voïkoff (1914, p. 86).
92. Annexe A.8, 1, 2 et 3.
93. Guye fait explicitement référence aux travaux de J. S. Townsend qui fonde la théorie de la décharge électrique sur l'ionisation par choc. Voir Townsend (1915).
94. Annexe A.8, 1 2 et 3, 6 et 7, 4, 5, 8, 9, 1, 2 et 4, 3, 5, 1.

travaux sur l'arc, l'aimantation ou le frottement intérieur peuvent être qualifiés d'explorations expérimentales. Par exemple, dans les recherches menées avec Schidlof sur l'hystérésis, il se livre à une "étude comparative" du phénomène selon les matériaux et les conditions expérimentales.

> "La première partie de ce travail s'occupe de la question suivante : la puissance consommée par l'hystérésis est-elle ou non une fonction linéaire de la fréquence ? En d'autres termes, la perte d'énergie par cycle dépend-elle de la vitesse avec laquelle le cycle d'aimantation est parcouru ?
> La deuxième partie contient une étude comparative des pertes d'énergie par hystérésis alternative dans quelques corps magnétiques à une fréquence élevée et pour différentes saturations." [95]

Dans le cas de l'arc voltaïque, Guye est guidé par les applications industrielles. Il dépose plusieurs brevets sur l'obtention de l'acide nitrique par l'arc électrique avec son frère Philippe-Auguste et le chimiste André Naville entre 1895 et 1908. Les recherches qu'il dirige au sein de son laboratoire portent plus précisément sur la stabilité de l'arc.

> "L'importance croissante que prend l'emploi des arcs voltaïques entre métaux, dans les réactions gazeuses en général et dans la production des vapeurs nitreuses en particulier, nons [sic] a engagés à étudier expérimentalement et de plus près qu'on ne l'a fait jusqu'ici, les facteurs qui agissent sur la différence de potentiel et la stabilité de l'arc alternatif entre métaux.
> [...]
> Nous avons donc jugé utile de reprendre une série d'expériences méthodiques sur l'arc alternatif de faible intensité, dans des conditions plus précises et mieux définies qu'on ne l'a fait jusqu'ici, en cherchant à bien mettre en évidence le rôle de chacun des facteurs qui influent sur la différence de potentiel mesurée aux électrodes." [96]

L'étude du frottement intérieur est pour Guye l'occasion de s'intéresser plus directement au "mécanisme intime" [97] du phénomène. Mais même s'il formule des hypothèses microscopiques susceptibles d'expliquer ses observations, l'apport des recherches menées au laboratoire réside surtout dans l'étude détaillée du phénomène, dans la présentation de dispositifs permettant selon lui d'obtenir des résultats toujours plus précis et dans la prise en compte de phénomènes parasites nuisibles à l'interprétation des observations.

95. Guye et Schidlof (1904, p. 578-579).
96. Guye et Bron (1908, p. 453-454).
97. Guye et Berchten (1912, p. 356).

En ce qui concerne ses travaux sur la décharge électrique après 1916, la démarche de Guye est différente. Il n'hésite en effet plus à intégrer des considérations théoriques personnelles aux études expérimentales.

> "Le présent travail avait donc pour but de reprendre avec beaucoup plus de précision l'étude du potentiel disruptif dans l'acide carbonique comprimé et de rechercher *en même temps*, ainsi que la suggestion en avait été faite par l'un des auteurs, si la polarisation du gaz aux fortes densités, ne serait pas de nature à créer un champ moléculaire susceptible de faciliter le passage de la décharge aux pressions élevées." [98]

De la même manière, il propose en 1917 une *Théorie de la rotation de la décharge électrique sous l'influence d'un champ magnétique* [99] à l'origine de travaux expérimentaux débutant dès la même année [100]. En 1921, il présente à nouveau cette théorie mais cette fois comme un "Essai de théorie" [101]. Dans son travail suivant, en 1922, son objectif n'est alors pas tant de vérifier cette "théorie" mais de montrer qu'elle est satisfaite pour un certain régime de la décharge [102] et que son emploi permet de mesurer les diamètres des molécules qui constituent le gaz dans lequel sont réalisées les expériences.

> "Ces mesures montrent que la vitesse de rotation est fonction du poids moléculaire et du carré des diamètres moléculaires. Jointes à celles de M. Townsend et de M. Ramsauer sur les électrons, elles confirment l'avis de M. Guye que la déviation des ions et des électrons par un champ magnétique peut servir à étudier le diamètre des molécules du gaz et des vapeurs." [103]

Guye allie ainsi sa connaissance du phénomène et ses idées théoriques. Il n'oublie de plus pas de mettre en avant les difficultés expérimentales auxquelles il est confronté :

> "[...] mais ces expériences ont montré toute l'importance qu'il faut attacher à la purification des gaz si l'on veut obtenir des résultats de quelque précision.
>
> Nous avons donc repris une nouvelle série de recherches, en apportant un soin tout particulier à la purification des gaz. Les expériences ont alors fait ressortir

98. Guye et Mercier (1920, p. 30-31 ; nous soulignons).
99. Guye (1917b).
100. En fait, les premières recherches restent inédites pour des raisons que nous n'avons pas élucidées. La première publication n'a lieu qu'en 1921.
101. Guye et Rothen (1921, p. 466).
102. Guye et Rudy (1921, p. 5).
103. Guye et Rudy (1923, p. 258).

> très nettement divers régimes de décharge dont un satisfait bien à la théorie établie." [104]

Nous venons de mettre en évidence deux facettes du physicien Guye. La première consiste à s'emparer d'un problème expérimental et à y répondre en mettant au point des dispositifs expérimentaux toujours améliorés, afin d'étudier un phénomène de façon systématique, comme il le fait dans le cas de l'arc voltaïque, du frottement intérieur et de l'aimantation. La seconde facette apparaît à partir des années 1912-1914, initialement dans l'étude du frottement intérieur. Il fait interagir ses recherches de laboratoire et des conceptions ou hypothèses théoriques sur la constitution de la matière, son "mécanisme intime". Celle-ci est encore développée lors de ses travaux sur la décharge électrique puisque cette "interaction" est pleinement assumée : ses idées théoriques *publiées* sont le déclencheur de recherches expérimentales dont le développement donne lieu à de nouvelles considérations théoriques [105].

Sur ce dernier point, il est essentiel de noter que si les travaux effectués sous sa direction sont explicitement orientés par ses conceptions théoriques, ceux effectués sous la direction de Mercier, troisième assistant au laboratoire, en 1920 et 1921, retrouvent l'aspect plus phénoménologique des premiers travaux de Guye. La citation suivante illustre la vision que nous avons développée de Guye, directeur de laboratoire :

> "Au cours des expériences effectuées sur le potentiel disruptif [...], M. Pierre Mercier avait remarqué que la décharge disruptive, aux courtes distances et aux pressions élevées présentait un caractère nettement différent [...]
>
> Il nous a semblé que cette modification qui se produit alors dans la nature de la décharge disruptive pourrait avoir pour cause une accumulation dans le diélectrique d'ions négatifs et positifs au voisinage des électrodes ; [...]
>
> Sans qu'il soit pour le moment possible de vérifier quantitativement cette explication, elle semble néanmoins fort plausible et tous les phénomènes observés dans notre travail avec M. Mercier lui sont qualitativement favorables. Néanmoins nous avons estimé qu'il y avait lieu de reprendre une étude systématique de l'influence de la forme des électrodes et de la pression du gaz sur le potentiel disruptif de façon à être mieux fixés sur ce point. C'est de cette étude que M. P. Mercier a bien voulu se charger en collaboration avec M. Hammershaimb [106]

104. Guye et Rudy (1923, p. 183).
105. Voir ses travaux théoriques sur les phénomènes d'entraînement du gaz dans la décharge et sur la rotation spontanée de la décharge, en 1923. Annexe A.9, 2, 3 et 4.
106. Mercier et Hammershaimb (1920).

et dont il communique aujourd'hui les résultats préliminaires." [107]

Un troisième aspect du travail de laboratoire de Guye consiste à mettre au point des appareils de mesure. Ainsi, en parallèle de ses recherches sur les courants alternatifs, à Zürich comme pendant ses premières années à la tête du laboratoire, Guye met au point divers appareils et méthodes de mesure permettant de mesurer la puissance électrique consommée en courant alternatif [108].

Un appareil de mesure revêt dans le cadre de notre travail une importance toute particulière : l'électromètre sous pression mis au point avec le second assistant Aron Tscherniawsky entre 1910 et 1913. Nous y revenons dans la partie suivante.

107. Guye et Mercier (1920, p. 420-421).
108. Annexe A.6.

2.3 Comment situer les expériences sur l'inertie des électrons parmi les travaux scientifiques de Guye ?

Introduction

L'étude réalisée précédemment nous a permis de découvrir l'activité de Guye au cours de sa carrière à la tête du laboratoire de physique de l'Université de Genève. Nous avons pu mettre en évidence les conditions de son arrivée dans un laboratoire de petite taille, peu porté sur les sujets qu'il affectionne, mais qu'il parvient à développer peu à peu, tant du point de vue des équipements et des travaux effectués, que de celui de son organisation.

Les quelques éloges, hommages et mémoires cités en introduction à ce chapitre laissent entendre que le travail majeur de Guye est celui qu'il a consacré à la mesure de la variation de l'inertie des électrons en fonction de leur vitesse. En termes de temps et de publications, nous pouvons désormais dire que ces expériences ne semblent constituer qu'une petite partie de son œuvre scientifique.

De façon évidente, la réception de son travail est biaisée par l'importance de la théorie de la relativité. Mais s'il est indéniable que ses autres recherches n'ont pas eu l'impact de celle menée avec Ratnowsky et Lavanchy, notre objectif de parvenir à mieux les situer au sein de la carrière de Guye exclut de les considérer d'emblée comme "à part" et nous conduit à chercher plutôt dans quelle mesure elles s'intègrent aux travaux menés à Genève sous la direction de Guye. Ainsi, nous pourrons mettre à jour la singularité de cette recherche et percevoir l'attitude de Guye face à la théorie de la relativité.

Pour aborder cette question complexe, nous commençons par nous demander pourquoi Guye choisit de se pencher sur le problème expérimental de l'inertie de l'électron. Dans les cas de Kaufmann, Bucherer ou Hupka, le travail des historiens permet de proposer des hypothèses [109]. Il semble relativement naturel pour Kaufmann de se lancer dans ses mesures de la variation de l'inertie avec la vitesse. Ses recherches de la fin des années 1890 ont conduit avec celles de J.J. Thomson et Wiechert à la "découverte" [110]de l'électron. Il travaille à Göttingen avec Abraham et est

109. Les travaux de Proctor sont trop peu connus pour avoir été analysés et nous n'avons de notre côté pas trouvé d'élément permettant de justifier cette expérience. Il en va de même pour ceux de Jones en 1916. Quant à ceux de Neumann et Schaefer, nous n'en savons pas suffisamment pour nous prononcer. L'étude de leur travail reste à faire.

110. Nous revenons sur la difficulté du terme "découverte" dans la partie 5.1 et nous donnons des références à consulter sur le sujet dans la note 33 de cette même partie.

impliqué dans le programme réductionniste électromagnétique. Il possède quantité de savoir-faire sur les rayonnements électroniques qu'il peut investir dans ce travail qui aura l'impact que l'on a rappelé plus tôt. Bucherer est également un expérimentateur chevronné, et il a proposé en 1904 un modèle d'électron prévoyant une variation de l'inertie avec la vitesse. Enfin, Hupka est supervisé de façon officieuse par Planck, insatisfait des résultats de Kaufmann et de Bucherer et impliqué dans la défense de la relativité.

Qu'en est-il pour les expériences de Guye ? Quelles sont ses motivations ? De quels moyens dispose-t-il pour oser se lancer dans des expériences réputées extrêmement difficiles ?

2.3.1 Guye et la question de l'inertie de l'électron

2.3.1.1 Conférences sur la "constitution électrique de la matière" en 1904

Dès ses premiers travaux sur l'arc voltaïque, et bien que leur objectif affiché soit d'ordre phénoménologique et industriel, Guye affiche explicitement son intérêt pour les questions de constitution de la matière.

> "M. Guye croit qu'à ce point de vue, l'étude des arcs de très faible intensité est très digne d'intérêt et peut nous révéler certains caractères atomiques de la décharge électrique." [111]

Tout au long de sa carrière, il ne cessera d'ailleurs d'explorer ces questions. Il étudie la constitution des solides au cours des recherches sur le frottement intérieur et sur l'aimantation, puis il utilise ses travaux sur la décharge pour déterminer les diamètres moléculaires et explorer le mécanisme microscopique du passage du courant dans les gaz.

En février et mars 1904, il donne des conférences à la faculté des sciences de l'Université de Genève : "*Les hypothèses modernes sur la constitution électrique de la matière — Rayons cathodiques et corps radioactifs*" [112]. Ces conférences sont regroupées en deux parties publiées dans le *Journal de chimie physique* [113] et reprises dans la première série des *Travaux du laboratoire de physique* parue en 1904. La première porte sur la "théorie électrique de la matière" et la seconde sur "les arguments tirés de l'expérience".

111. Guye et Monasch (1903, p. 350).
112. Guye (1904).
113. Plus précisément dans les tomes 2 n° 9 et 3 n° 3, en 1904 et 1905.

Première partie Guye commence par reprendre les idées énoncées par Poincaré dans *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes* au sujet de la recherche d'explications mécaniques aux phénomènes électriques.

> "Expliquer les phénomènes physiques et particulièrement les phénomènes électriques par des considérations purement mécaniques est un problème dont la solution a tenté bien des esprits." [114]

Il estime ensuite que la recherche inverse, initiée selon lui par Maxwell en proposant une théorie électromagnétique de la lumière, s'annonce "intéressante" et "ce qui est plus important, un certain nombre de faits expérimentaux sont venus [lui] fournir un sérieux appui" [115]. Dans la première partie de ses conférences, il ne décrit ni ne commente ces "faits expérimentaux". Il commence par exposer le problème de l'inertie électromagnétique, qu'il considère dans la lignée des tenants du programme réductionniste électromagnétique comme primordial :

> "Pour arriver à une interprétation électromagnétique des phénomènes mécaniques, il faut d'abord donner une explication satisfaisante de l'inertie de la matière." [116]

Il s'intéresse ensuite à la question de l'"inertie électromagnétique d'une charge en mouvement" [117]. Il rappelle les travaux fondateurs de Thomson, Heaviside et Searle puis donne la formule suivante reliant la masse m et la vitesse v d'une particule de charge e et de rayon a. La vitesse de la lumière est notée V selon l'usage de l'époque.

> "[...] on peut la [l'inertie électromagnétique] mettre sous la forme plus générale
>
> $$m = \frac{2e^2}{aV^2}\left[\frac{1}{3} + \frac{1}{5}\left(\frac{v}{V}\right)^2 + \frac{1}{7}\left(\frac{v}{V}\right)^4 + \text{.....}\right]. \tag{2.1}$$
>
> De là cette conséquence fondamentale : *l'inertie électromagnétique de l'électricité est une fonction de la vitesse ; elle est pratiquement constante lorsque la vitesse de déplacement est petite par rapport à la vitesse de la lumière, elle tend vers l'infini lorsque la vitesse de déplacement atteint celle de la lumière.*" [118]

Guye ne tire à ce stade de son exposé pas de conséquence de cette formule, si ce n'est que la détection de la variation de l'inertie avec la vitesse nécessite une vitesse "énorme".

114. Guye (1904, p. 5).
115. Guye (1904, p. 11).
116. Guye (1904, p. 15).
117. Guye (1904, p. 19).
118. Guye (1904, p. 20).

Après un paragraphe sur l'induction et la radiation, Guye expose l'"[h]ypothèse sur la constitution de la matière" [119] telle qu'envisagée par les tenants de la vision tout-électromagnétique : l'atome est composé d'un "très grand nombre de charges électriques [...] animées de mouvements vibratoires très rapides" [120]. Il ne s'aventure pas plus avant dans ces hypothèses, "désirant [se] borner surtout à la notion de l'inertie de la matière" [121].

Guye demeure prudent et rappelle constamment le caractère hypothétique de la description électromagnétique de la matière. Il semble néanmoins intéressé par cette approche.

> "Si les corps matériels sont composés uniquement d'électrons, l'inertie électromagnétique de ces électrons s'identifie avec l'inertie de la matière.
>
> [...]
>
> Il en résulte cette conclusion du plus haut intérêt.
>
> *Tous les phénomènes mécaniques que nous observons ne sont qu'un cas particulier d'un phénomène plus général, le phénomène électromagnétique.*
>
> *En considérant la masse comme constante, la mécanique ne traite donc qu'un cas particulier, celui où la vitesse des corps est petite par rapport à celle de la lumière.* [122]

Deuxième partie Après des rappels classiques sur les propriétés générales des rayons cathodiques [123], il expose les méthodes permettant de déterminer leur charge spécifique et leur vitesse : calcul de la vitesse par la mesure du potentiel de décharge, mesure de la déviation magnétique, mesure de la déviation électrique, mesure de chaleur dégagée lors de l'impact des rayons. Il donne ensuite les valeurs de la charge spécifique mesurées par Kaufmann, Simon et Seitz. Il fait de plus référence à l'expérience de Starke en 1903 sur la mesure de la charge spécifique pour des rayons cathodiques rapides [124].

Ensuite, il présente les résultats de Kaufmann publiés en 1901 [125] comme en accord "tout à fait remarquable" avec le "calcul" [126].

119. Guye (1904, p. 24).
120. Guye (1904, p. 24).
121. Guye (1904, p. 26).
122. Guye (1904, p. 27 ; italiques originales).
123. On retrouve les mêmes expériences et interprétation sur la nature corpusculaire des rayons cathodiques, en plus détaillé, chez Villard (1900), que Guye à très certainement lu.
124. Voir plus haut, 1.6.1.1 note 120.
125. Kaufmann (1901b).
126. Guye (1904, p. 204).

> "[...] il en résulte, conformément aux idées théoriques développées (Abraham, Lorentz, etc., I^{re} partie), que l'inertie électromagnétique m augmente en même temps que la vitesse.
>
> La concordance entre le calcul et l'expérience est tout à fait remarquable." [127]

Il est difficile de percevoir à ce stade comment il se situe par rapport aux théories d'Abraham et de Lorentz. Ses conférences datant de février et mars 1904, il ne peut alors avoir lu le travail de Lorentz dans lequel il expose finalement sa théorie de l'électron qui ne sera publié que le 23 avril en hollandais et le 27 mai en anglais [128]. A-t-il cependant ajouté la référence à Lorentz pour la publication dans le *Journal de chimie-physique* de la deuxième partie de sa conférence en 1905 ? En effet, dans la première partie, publiée en 1904, il ne fait pas référence à Lorentz, contrairement à ce qu'il laisse entendre. Toujours est-il qu'il ne s'intéresse alors pas encore à la différence entre les deux théories. Il ne précise pas si le "calcul" se fait dans le cadre de l'une ou de l'autre.

La lecture de ce texte permet toutefois de montrer que Guye a certainement continué à travailler sur les expériences de Kaufmann et la théorie d'Abraham car il propose dans cette seconde partie une "formule théorique d'Abraham" [129] différente de celle donnée dans la première partie (Eq. 2.1). Cette fois, il donne la formule pertinente pour interpréter les résultats de Kaufmann, celle pour la masse transversale, soit :

$$m = \frac{e^2}{aV^2}\left[\frac{2}{3} + \frac{4}{3.5}\left(\frac{v}{V}\right)^2 + \frac{6}{5.7}\left(\frac{v}{V}\right)^4 .....\right]. \tag{2.2}$$

Il poursuit son exposé par diverses expériences qui permettent d'avoir accès à la charge de l'électron, sa masse, celle de l'atome d'hydrogène ...

Il finit enfin par revenir à la question qu'il avait déjà soulevée dans la première partie : "Comment devons-nous nous représenter les atomes des corps simples dans la théorie électrique de la matière ?" [130]. Les réponses hypothétiques lui semblent cependant encore peu fiables. Il affirme alors :

> "Nous pensons d'ailleurs qu'il y a tout profit pour la science à perfectionner d'abord les méthodes de mesure actuellement encore très imparfaites et lorsque

127. Guye (1904, p. 204).
128. Miller (1981, p.66).
129. Guye (1904, p. 201 ; note 1).
130. Guye (1904, p. 217).

> la précision des résultats expérimentaux sera plus grande, il sera plus aisé de faire un choix judicieux parmi ces diverses conceptions. En se hâtant de vouloir préciser on risque fort d'édifier des systèmes trop éphémères." [131]

2.3.1.2 La charge spécifique l'électron — 1906

Utilisation de la théorie d'Abraham Un peu moins de deux années après ces conférences qui constituent la première trace écrite de son intérêt pour les théories de l'électron, Guye poursuit sa réflexion sur le sujet, cette fois de manière plus détaillée. Lors de la séance de *Société de physique et d'histoire naturelle de Genève* qui se tient le 1^{er} février 1906, il communique un nouveau travail sur la valeur de charge spécifique de l'électron [132]. Celle-ci est relativement brève mais elle est complétée et détaillée en mars, ce qui donne lieu à une nouvelle publication dans les *Archives* en mai [133]. Entre temps, elle a été envoyée aux *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* et lue lors de la séance du 2 avril [134].

L'idée directrice de ce travail repose sur l'assimilation par Guye de l'existence de formulations différentes de la masse dans la théorie d'Abraham [135]. Dans l'article de mai, il fait référence aux *Principes de la dynamique de l'électron* d'Abraham qu'il a étudiés dans le recueil publié en 1905 par Henri Abraham et Langevin [136]. Il remarque ainsi que, dans le travail de Simon très souvent cité à l'époque [137], le calcul de la charge spécifique, $\frac{\epsilon}{\mu_0}$, repose sur les relations suivantes [138] :

$$\frac{1}{2}\mu v^2 = \epsilon U \tag{2.3}$$

$$\epsilon H = \mu \frac{v}{\rho}. \tag{2.4}$$

Or, nous dit Guye, "les deux valeurs de μ qui figurent dans les expériences [Eq. 2.3] et [Eq. 2.4] ne sont égales que si la vitesse est suffisamment petite" [139]. Il poursuit

131. Guye (1904, p. 220).
132. Guye (1906a).
133. Guye (1906b).
134. Guye (1906c).
135. Voir Partie 1.2.3.
136. Guye (1906b, note 2 p. 462) et Abraham et Langevin (1905) pour le livre de H. Abraham et Langevin. Voir également Partie 5.2.1 pour quelques détails sur cet ouvrage.
137. Simon (1899).
138. U est le potentiel sous lequel sont accélérés les électrons, H le champ magnétique de déviation et ρ le rayon de courbure de la trajectoire des électrons déviés.
139. Guye (1906a, p. 347).

en affirmant que la prise en compte de cette différence "conduit à une correction d'environ 1 pour cent"[140] sur la valeur calculée de la charge spécifique de l'électron. Grâce à cette correction, la valeur proposée par Simon en 1899 et celle "déduite des expériences de Kaufmann sur les électrons du radium"[141] s'accordent davantage. Guye conclut à un "argument de plus en faveur de l'hypothèse de l'identité des électrons en jeu dans les rayons cathodiques et les rayons de Becquerel"[142].

Cette conclusion ne varie pas dans les deux courtes publications qui suivent. Dans l'étude que nous menons dans la partie 5.3.2, nous montrons que cette question de l'identité des particules composant les différents rayonnements demeure d'actualité jusque dans les années 1905-1906. Le fait que Guye conclue sa remarque de cette manière est donc bien le signe de son intérêt pour les questions de constitution de la matière. Sa lecture de l'ouvrage de Langevin et Abraham au cours de l'année 1905, et en particulier de l'article d'Abraham, attestée par la référence soulignée plus haut, montre de plus qu'il s'intéresse à ces questions aussi sur un plan théorique.

Dans les publications suivantes, Guye détaille le calcul de la correction et explicite les définition des différentes "masses" qui émergent de la théorie d'Abraham.

La démonstration proposée par Guye est la suivante. Il récrit les relations Eq. 2.3 et Eq. 2.4 en tenant compte de la non-égalité des masses, soit,

$$\frac{1}{2}\mu' v^2 = \epsilon U \tag{2.5}$$

$$\epsilon H = \mu_2 \frac{v}{\rho}. \tag{2.6}$$

Il en déduit alors

$$\frac{\epsilon}{\mu_2} = \left[\frac{\mu}{\mu'}\right] \frac{2U}{H^2\rho^2}. \tag{2.7}$$

Il identifie μ_2 à la masse transversale et donne son développement en série (Eq. 2.2).

"La valeur de μ_2 n'est autre que la masse dite *transversale* ; développée en série

140. Guye (1906a, p. 347).
141. Guye (1906a, p. 348).
142. Guye (1906a, p. 348).

elle devient, comme chacun sait . . . "[143]

Pour donner la relation entre la masse μ' et la vitesse v, Guye est guidé par des considérations sur l'énergie cinétique. Tout d'abord, il donne la formule calculée par Abraham de l'énergie totale d'un électron sphérique indéformable (Eq. 1.1). Il identifie ensuite la différence entre cette énergie et celle de la charge immobile comme l'énergie cinétique la particule.

"L'accroissement d'énergie W' qui résulte du mouvement est donc

$$W' = \frac{3}{4}\mu_0 \left[\frac{1}{\beta}\ln\frac{1+\beta}{1-\beta} - 2\right]$$

soit en développant

$$W' = \frac{3}{2}\mu_0 \left[\frac{\beta^2}{3} + \frac{\beta^4}{5} + \frac{\beta^4}{7} + ...\right]$$

En posant

$$W' = \frac{1}{2}\mu' v^2 \text{ et } v = \beta V$$

il vient :

$$\mu' = \mu_0 \left[1 + \frac{3}{5}\beta^2 + \frac{3}{7}\beta^4 + ...\right]$$ [144]

Enfin, à partir des développements en série de μ' et μ_2, il déduit le rapport $\frac{\mu_2}{\mu'}$:

$$\frac{\mu_2}{\mu'} = 1 - \frac{\beta^2}{5}. \tag{2.8}$$

La formule ainsi corrigée de Simon s'accorde mieux à la formule extrapolée par Kaufmann, ce qui autorise Guye à conclure à un nouvel argument en faveur de l'identité des rayons β et cathodiques.

Dans les publications de mars et de mai 1906, Guye ne s'arrête pas à cette conclusion. Il ajoute en effet une note commune aux deux communications sur différentes "masses" et leur distinction.

Ainsi, il montre que dans "la théorie développée par M. Abraham"[145], la masse longitudinale μ_1 peut être reliée à la masse μ'. En effet, μ' est définie par Guye

143. Guye (1906b, p. 464).
145. Guye (1906c, p. 835) et Guye (1906b, p. 466).

comme $W' = \frac{1}{2}\mu' v^2$. Or, dans la théorie d'Abraham, la masse longitudinale est définie à partir de l'énergie totale par la relation Eq. 1.2. Donc,

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{1}{v}\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}v} \\ \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}v} &= \frac{\mathrm{d}W'}{\mathrm{d}v} \\ \mu_1 &= \frac{1}{v}\left[\frac{1}{2}v^2\frac{\mathrm{d}\mu'}{\mathrm{d}v} + \mu' v\right] \\ \mu_1 &= \frac{1}{2}v\frac{\mathrm{d}\mu'}{\mathrm{d}v} + \mu'. \end{aligned} \tag{2.9}$$

La masse μ' est reliée à la masse longitudinale comme cette dernière l'est à la masse transversale. Guye interprète enfin cette "nouvelle" masse comme une masse *cinétique*.

> "En résumé nous avons à distinguer :
>
> 1° La *masse longitudinale* [...]
>
> 2° La *masse transversale* [...]
>
> 3° La *masse* que l'on pourrait appeler *cinétique* [...]
>
> Cette masse μ' multiplie par $\frac{1}{2}v^2$ représente en effet l'*énergie cinétique* de l'électron. Comme les masses longitudinale et transversale, la masse cinétique est fonction de la vitesse ; elle est reliée à la masse longitudinale par l'équation différentielle [2.9]." [146]

Cette notion de "masse cinétique" semble trouver son origine chez Poincaré. En 1913, dans *L'inertie de l'énergie et ses conséquences* [147], Langevin souligne que "la notion de masse, fondamentale en mécanique, peut être introduite de trois manières différentes" [148] : comme coefficient d'inertie $m = \frac{force}{accélération}$, capacité d'impulsion $\vec{G} = m\vec{v}$ et capacité d'énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2}mv^2$. Au sujet de cette dernière relation, il dit :

> "On pourrait aussi utiliser cette relation pour définir la masse comme *capacité d'énergie cinétique*, comme quotient du double de l'énergie cinétique ou force vive par le carré de la vitesse (masse cinétique de H. Poincaré)." [149]

146. Guye (1906b, p. 466-467), et sous une formulation à peine différente dans l'article des *Comptes Rendus*.
147. Langevin (1950b).
148. Langevin (1950b, p. 397).
149. Langevin (1950b, p. 398).

Guye reprend presque à la lettre cette introduction de Langevin dans son *Mémoire* de 1921, et lui attribue directement :

> "Ainsi que l'a indiqué M. Langevin dans le brillant exposé qu'il a fait de cette question, la notion de masse peut être introduite en mécanique de trois façons différentes [...]." [150]

Dans sa note de 1906, il ne mentionne ni Langevin ni Poincaré, comme s'il était le premier à introduire et à calculer la "masse cinétique" dans la théorie de l'électron [151].

Le 2 mars 1906 paraît l'article final de Kaufmann. À la fin de cet article, un appendice est consacré à la "détermination de ϵ/μ_0 des rayons cathodiques" [152].

> "Dans mes précédents travaux, et également dans la dernière publication dans les *Berliner Berichten* que je cite ici, j'ai donné pour ϵ/μ_0 la valeur $1{,}885.10^7$ extrapolée de la mesure de Simon $1{,}865.10^7$. La méthode d'extrapolation appliquée n'était cependant pas complètement correcte, puisque je n'avais pas suffisamment tenu compte de la différence entre les masses transversale et longitudinale." [153]

La démonstration de Kaufmann diffère de celle de Guye puisqu'il n'introduit pas la "masse cinétique". À partir du développement en série de l'énergie totale de l'électron, il calcule l'énergie acquise par l'électron au cours de son accélération par le champ électrique. Il identifie ainsi cette énergie à celle fournie par le champ électrique. Il calcule ensuite la déviation magnétique dans laquelle intervient la masse transverse. Les deux équations lui permettent alors de calculer la valeur de ϵ/μ_0 corrigée. Il trouve la même valeur que Guye.

Le raisonnement de Kaufmann nous montre la spécificité de celui de Guye qui introduit une masse "cinétique" μ'. Une autre différence importante est que Kaufmann effectue le calcul dans le cadre des trois théories de l'électron d'Abraham, de

150. Guye (1921, p. 277).
151. Chez Poincaré, nous avons trouvé la notion introduite de la façon suivante : "L'énergie cinétique ou force vive s'exprime très simplement à l'aide des masses et des vitesses relatives de tous les points matériels, par rapport à l'un d'entre eux. Ces vitesses relatives sont accessibles à l'observation, et, quand nous aurons l'expression de l'énergie cinétique en fonction de ces vitesses relatives, les coefficients de cette expression nous donneront les masses." (Poincare, 1952, p. 240).
152. Kaufmann (1906, p. 548-551).
153. Kaufmann (1906, p. 458) : "In meinen bisherigen Arbeiten, auch in der eingangs zitierten letzten Publikation in den Berliner Berichten habe ich für ϵ/μ_0 den Wert $1{,}885.10^7$ als extrapoliert aus der Simonschen Zahl $1{,}865.10^7$ angegeben. Das angewandte Extrapolationsverfahren war jedoch nicht ganz korrekt, da ich bei der Rechnung der Unterschied zwischen transversaler und longitudinaler Masse nicht genügend berücksichtigt hatte."

Bucherer et de Lorentz, alors que Guye se borne à celle d'Abraham.

Il paraît surprenant que Guye ne fasse pas mention de la théorie de Lorentz qu'il ne peut que connaître alors, ne serait-ce que par sa lecture du recueil de H. Abraham et Langevin. Croît-il aux conclusions expérimentales de Kaufmann ? Les objections d'Abraham sur l'instabilité de l'électron de Lorentz et donc son incompatibilité avec la possibilité d'une physique tout-électromagnétique lui font-ils préférer la théorie du chercheur allemand ? Il semble plus probable que Guye se fonde sur son analyse du travail expérimental de Kaufmann.

Quoiqu'il en soit, il ajoute en *Nota Bene* à l'article des *Archives* de mai 1906 la remarque suivante :

> "N. B. — Les considérations qui précèdent ont été présentées à la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève le 1^{er} février 1906 (voir *Arch. des Sc. Phys. et Nat.*, mars 1906). Cette note était entièrement rédigée lorsque parut en mars 1906 le remarquable travail que vient de publier M. Kaufmann. Dans ce travail M. Kaufmann, de son côté, a effectué presque le même calcul, qui l'a conduit à la même valeur
>
> $$\frac{\epsilon}{mu_0} = 1.878 \times 10^7$$
>
> pour les rayons cathodiques. Il est intéressant de constater également que les nouvelles séries d'expériences effectuées sur les rayons β du radium, ont donné pour $\frac{\epsilon}{mu_0}$ (théorie d'Abraham) les valeurs 1.858, 1.788, 1.823, c'est-à-dire des nombres très voisins de celui de notre formule II [154] ; les conclusions de cette note ne sont donc nullement modifiées." [155]

Guye tient donc à se prévaloir de la prise en compte des subtilités induites par la théorie de l'électron quant à la définition de différentes masses. Il affirme ainsi l'indépendance de son travail, que notre étude révèle comme effectivement original.

2.3.1.3 Guye et l'inertie entre mai 1906 et 1907

L'intérêt de Guye pour la question de l'inertie des électrons semble bien venir de celui plus général pour l'étude de la constitution de la matière. La période 1904-1906 marque une attention soutenue aux développement des théories de l'électron,

154. La formule II donne la valeur de la charge spécifique déduite des "meilleurs clichés" de Kaufmann avant 1906. C'est à cette valeur que Guye compare la valeur de Simon corrigée.
155. Guye (1906b, p. 467-468).

qui aboutit à la publication des articles sur la valeur de la charge spécifique de l'électron. Que se passe-t-il alors jusqu'à la mise en route du travail expérimental avec Ratnowsky en 1907 ? Comment Guye passe-t-il d'un intérêt théorique à la mise au point d'un dispositif de mesure ?

Jusque mai 1906, Guye ne considère que la théorie d'Abraham, certainement guidé dans ce choix par les conclusions de Kaufmann. Celles-ci ne tardent cependant pas à être remises en question, si bien que le doute sur leur validité s'installe [156]. Guye suit certainement de près ces débats publiés dans les journaux allemands. Quinze ans plus tard, il s'exprime ainsi à ce sujet :

> "Les travaux qui font l'objet de ce mémoire ont été entrepris à la suite des discussions auxquelles avaient donné lieu les expériences bien connues de Kaufmann sur la variation de l'inertie des corpuscules β du radium." [157]

Cette "auto-interprétation" rétrospective ne semble pas trop éloignée des faits.

Il est difficile de définir à quel moment Guye envisage de mettre au point une expérience destinée à départager les formules d'Abraham et de Lorentz. En effet, la critique de Planck en septembre 1906 est encore fragile. Si des doutes émergent, en particulier au sujet de l'analyse des observations, il faut attendre le travail de Bestelmeyer publié début 1907, puis la nouvelle analyse de Planck publiée fin juillet 1907 pour mettre à jour une défaillance dans le dispositif de Kaufmann.

Or Guye annonce démarrer le travail avec Ratnowsky en 1907. Nous n'avons trouvé aucun élément permettant de préciser cette date. Les doutes soulevés par Planck en 1906 ont-ils suffi à modifier l'opinion de Guye au sujet des expériences de Kaufmann ? S'agit-il plutôt des remarques de Bestelmeyer ? Ou faut-il attendre la critique reformulée par Planck dans laquelle il explicite le problème d'ionisation de l'air résiduel lors du passage des rayons β ?

Si l'on ne peut formuler de réponse ferme à ces questions, il est indéniable que la question de l'inertie fait partie des centres d'intérêt de Guye depuis 1904. Et si l'idée lui vient, certainement entre l'été 1906 et la deuxième moitié de l'année suivante, de réaliser une expérience visant à départager les formules de Lorentz et d'Abraham, c'est qu'il pense avoir les moyens de la mener à bien dans son laboratoire.

156. Voir Partie 1.6.2.1.
157. Guye (1921, p. 273).

2.3.1.4 Étudier l'inertie des électrons au laboratoire de Guye en 1907

Parvenir à résoudre les problèmes soulevés par les critiques formulées envers les conclusions de Kaufmann représente un défi expérimental de taille. D'un point de vue théorique également, le choix entre les théories d'Abraham et de Lorentz-Einstein a une portée qui va au-delà du choix entre deux formules [158]. De plus, Guye s'intéresse de près aux questions de constitution de la matière, il est désireux de développer son laboratoire et d'accroître son rayonnement. Un succès expérimental sur la question de l'inertie ne peut donc que l'attirer.

S'il se lance alors dans cette recherche, c'est qu'il pense pouvoir parvenir à ses fins. Mais possède-t-il tous les savoir-faire *a priori* nécessaires à cette entreprise ou décide-t-il consciemment de développer ceux qu'il sait lui manquer ?

Pour nous, l'intérêt d'aborder les débuts des expériences avec Ratnowsky sous cet angle réside dans la possibilité offerte par cette étude de mieux situer l'attitude de Guye face à la question de l'inertie en 1906-1907, de mieux percevoir dans quelle mesure il s'investit dans la mise au point de cette expérience et ainsi de s'affranchir — en partie — de l'ombre portée par la théorie de la relativité à laquelle il rattache son travail en 1921.

Comment décrire Guye l'expérimentateur avant 1907 ? Quels savoir-faire possède-t-il ? Les années passées à Zürich lui ont donné l'occasion de parfaire sa connaissance et sa maîtrise de la mesure en électricité. Ampèremètres, galvanomètres et voltmètres n'ont pas de secret pour lui. Arrivé à Genève, il se lance dans des recherches sur l'élasticité, l'aimantation, l'arc voltaïque, le potentiel explosif dans les gaz et la radioactivité [159]. Que nous apprennent ces travaux ?

Les techniques du vide et étanchéité des tubes La principale critique formulée à l'encontre des expériences de Kaufmann concerne la qualité du vide dans l'enceinte. Guye est confronté à la problématique du vide dans ses recherches sur l'arc électrique, l'élasticité et la décharge. Dans les deux premiers cas, il s'agit de réaliser des vides relativement faibles, entre quelques dixièmes de *mm* de mercure et 1 *cm* de mercure. Dans le troisième, la pression doit atteindre plusieurs dizaines d'atmosphères.

158. Nous employons l'expression "formule de Lorentz-Einstein" car il s'agit alors bien, en 1907-1908 de l'opposition entre l'électron indéformable et le programme réductionniste électromagnétique d'une part, et l'électron déformable et le principe de relativité d'autre part. Voir Partie 1.5.2.
159. Voir Fig. 2.2.

Le point commun entre ces travaux réside dans la réalisation d'enceintes étanches.

> "L'appareil destiné à nos recherches devait satisfaire aux deux conditions suivantes : être étanche, de manière à ce que l'on puisse pousser le vide aussi loin que possible ; en second lieu, permettre une chauffe régulière dans tout l'appareil." [160]

Pour réaliser le vide, Guye utilise une pompe à mercure avec Romilly en 1906 [161], puis une "pompe rotative à un seul corps de Bianchi" [162] avec Bron en 1908. Avec Mintz, en 1908, il utilise une trompe à eau. Pour l'étanchéité lors des traversées de l'enceinte de verre par des électrodes métalliques, il utilise, comme avec Ratnowsky puis Lavanchy, de la cire à cacheter. En 1905, il précise la façon de procéder à l'insertion d'une électrode dans le tube de façon étanche.

> "L'électrode inférieure a été fixée [...] contre les parois du tube avec de la cire à cacheter. [...]
> La fixation de cette électrode a été une opération assez délicate. Nous y avons procédé comme suit. [...]" [163]

L'"opération" est décrite dans le détail dans le paragraphe suivant de 17 lignes. La longueur et la précision de la description montre l'enjeu expérimental de la réalisation de traversées étanches. En revanche, Guye ne donne pas de détail sur la soudure "dans la masse du verre" [164] de l'électrode supérieure. De même, dans les publications futures, il ne donne plus de précision, se contentant de signaler l'utilisation de la cire à cacheter.

Le travail de Romilly constitue la première trace écrite de l'utilisation d'une pompe à vide dans les recherches menées au laboratoire de Guye. Il indique que la maîtrise des techniques du vide est alors suffisante pour faire le vide dans un tube puis injecter un gaz en quantité contrôlée. En 1905, Schidlof étudie les cycles d'aimantation à l'aide d'un tube de Braun [165]. Mais il ne mentionne rien au sujet du tube, de son fonctionnement, du vide et des moyens de l'obtenir. Le tube fait figure d'instrument classique de laboratoire dans la publication de Schidlof.

Guye semble donc, quand il commence ses recherches sur l'inertie, relativement coutumier de l'utilisation de pompes à vide même si, en comparaison avec celle uti-

160. Guye et Mintz (1908, p. 154).
161. Romilly (1906a) et Romilly (1906b).
162. Guye et Bron (1908, p. 462).
163. Guye et Guye (1905, p. 14).
164. Guye et Guye (1905, p. 15).
165. Schidlof (1905).

lisée avec Ratnowsky, celles-ci sont des modèles encore modestes et que les performances recherchées ne sont pas très poussées. En revanche, il paraît avoir développé de réels savoir-faire au sujet de l'étanchéité des tubes, aussi bien dans le domaine des basses que des hautes pressions [166].

Mais l'expérience menée avec Ratnowsky est la première dans laquelle une pompe à vide plus performante est utilisée. Il s'agit de pompe rotative mise au point par Gaede en 1906 et qui arrive sur le marché en 1908 [167]. Cette pompe arrive au laboratoire la même année [168]. Guye et Ratnowsky travaillent donc avec les modèles les plus récents à sa disposition. Son coût — 600 francs — fait de cette pompe l'appareil le plus cher du laboratoire.

La production de très hautes tensions Guye est confronté à la production de tensions élevées lors de son premier travail sur la décharge électrique dans les gaz en 1905. Il utilise une machine de Töpler à vingt plateaux de verre qui sera à nouveau utilisée avec Ratnowsky. Les tableaux de mesure publiés en 1905 indiquent que la tension maximale atteinte est d'environ 19,5 kV [169]. Ces tensions sont bien inférieures à celles nécessaires à l'étude de l'inertie des électrons. Guye n'utilisera d'ailleurs cette machine électrostatique que pour produire des faisceaux jusqu'à 13 kV.

Les recherches sur la décharge nécessitent également "l'emploi de potentiels constants et facilement réglables" [170]. Guye obtient la "constance du potentiel" [171] par un système de bouteilles de Leyde et de résistances. Guye décrit précisément ce système.

> "Les armatures intérieures de ces deux bouteilles étaient reliées entre elles et à la machine au moyen de grandes résistances FF'. Après avoir essayé de constituer les résistances FF avec de la ficelle paraffinée et non paraffinée, du coton, etc., nous avons obtenu les meilleurs résultats en employant de la ficelle (d'emballage) légèrement humectée et enfermée dans des tubes de verre afin qu'elle conserve toujours le même degré d'humidité. [...]" [172]

166. Ce savoir-faire et en particulier les questions de traversée verre-métal est probablement dû au préparateur du laboratoire Charles Margot. En poste depuis 1886, celui-ci a effectivement réalisé des travaux sur l'adhérence de l'aluminium au verre. Voir *Journal de Genève* le 10 juillet 1916.
167. Brachner (2002, p. 127).
168. de Physique".
169. Guye et Guye (1905, p. 113). Les valeurs sont données en V CGS. Jackson (2001, p. 819) indique que 1 V SI = 300 V CGS.
170. Guye et Guye (1905, p. 11).
171. Guye et Guye (1905, p. 11).
172. Guye et Guye (1905, p. 12).

Au delà de la méthode, cette description montre que Guye *met au point* le système lui permettant d'arriver à ses fins. Il apprend.

De même, pour le système de régulation du potentiel, il détaille le dispositif conçu, ainsi que la façon de l'utiliser et les précautions particulières auxquelles ils ont pensé.

> "Pour réaliser [...] la variation progressive et à volonté du potentiel, nous avons disposé en dérivation, entre l'un des pôles de la machine et la terre, un porte-étincelle R, formé de deux pinceaux métalliques très fins. L'un des pinceaux, qui est fixe, est relié directement à la machine électrostatique ; le second, qui est mobile, est monté sur la plate-forme d'une machine à diviser H. En tournant la vis de la machine, on pouvait donc le rapprocher ou l'éloigner à volonté du pinceau fixe. La machine à diviser étant reliée à la terre, cette manœuvre pouvait être exécutée sans inconvénient et sans risque de recevoir des secousses désagréables." [173]

Dans la publication avec Ratnowsky, la description a disparu.

> "Comme source de rayons cathodiques, nous avons utilisé une machine électrostatique, de Töpler, à vingt plateaux. Nous avons, en outre, régularisé le potentiel, soit par la marche uniforme de la machine, soit en fixant sur ses deux pôles deux balais placés en regard l'un de l'autre, à distance réglable. Des aigrettes jaillissaient entre ces balais. [174]

La mesure des très hautes tensions De la même manière que pour la production de tensions élevées, leur mesure est décrite dans le détail en 1905 alors que seul le type de l'instrument utilisé est signalé dans la publication de Ratnowsky.

Ces différences d'attitude face à la description du dispositif expérimental et de son utilisation suggère que, lors de son premier travail publié dans le domaine de la production et de la mesure des tensions élevées, Guye n'est pas encore tout à fait familier de ces techniques, ou du moins pas suffisamment pour ne pas les décrire en détail.

Fin 1909, Guye se lance avec Tscherniawsky dans la mise au point d'un électromètre [175]. Ce travail trouve son origine dans celui réalisé avec Ratnowsky [176]. Cela montre que le domaine de la mesure des tensions élevées est un domaine dans lequel

173. Guye et Guye (1905, p. 12-13).
174. Guye et Ratnowsky (1911, p. 313).
175. Guye et Tscherniawsky (1910).
176. Nous revenons dans le détail sur ce point dans la partie suivante 3.

Guye se spécialise au cours de ses différents travaux, d'abord avec H. Guye puis Ratnowsky.

À nouveau, cela suggère que, en 1907, il n'est pas encore un expert en la matière, comme il peut l'être déjà en ce qui concerne les mesures électriques plus courantes.

Conclusion Lorsque Guye commence courant 1907 son travail avec Ratnowsky, il possède un savoir-faire dans chaque domaine *a priori* nécessaire à la réalisation de l'expérience. Il est spécialiste des mesures électriques dans les circuits ; le tube cathodique fait figure d'instrument classique ; il a développé des techniques d'étanchéité et utilise déjà quelques pompes à vide ; il a de même déjà produit des tensions relativement élevées et s'est confronté au problème de leur régularisation, de leur réglage et de leur mesure.

Nous pouvons ainsi dire qu'outre un intérêt théorique certain pour la question de l'inertie des électrons, il possède dans son laboratoire les "bases" pour se lancer dans une telle expérience. Nous observons toutefois qu'il est amené à développer les performances atteintes dans les domaines du vide et de la production des hautes tensions. Pour cela, il investit dans du matériel de pointe — pompe de Gaede — et reprend des techniques expérimentales spécifiques — régulation du potentiel fourni par un alternateur — mise au point par d'autres chercheurs. Pour la mesure du potentiel, il sera même amené à mettre au point un appareil de mesure spécifique dédié à cette expérience [177]. À l'occasion du travail avec Ratnowsky, il introduit et développe ainsi de nouvelles techniques et nouveaux savoir-faire au laboratoire.

L'objectif initial de cette étude était de percevoir dans quelle mesure une recherche expérimentale sur l'inertie des électrons au laboratoire de physique de l'Université de Genève constituait en 1907 un investissement conséquent. Nous avons montré que c'est le cas, tant sur le plan financier [178] que sur celui des techniques que Guye doit apprendre et réinvestir, ou bien même mettre au point [179].

177. Par la suite, l'électromètre de Guye et Tscherniawsky sera utilisé dans d'autres recherches menées au laboratoire.

178. Nous avons donné le prix de la pompe de Gaede. Il faut rajouter celui de l'ampèremètre, 450 francs, acheté spécialement pour cette expérience.

179. Il est intéressant de noter que l'utilisation de l'enregistrement photographique par Guye et Lavanchy n'était que difficilement possible avec Ratnowsky puisque la faculté des sciences ne possède un laboratoire photographique qu'à partir de 1909. Voir Archives du DIP, carton 1985 va.5.3.4 Organisation 4.

2.3.2 Retombées des recherches sur l'inertie des électrons pour Guye et son laboratoire

2.3.2.1 La place de Guye en Suisse

L'étude de son "*curriculum*"[180] montre que Guye commence à se constituer une place de premier plan au sein de la physique suisse à partir de 1910, année de son entrée en fonction de Doyen de la Faculté des sciences. Il est réélu à ce poste en 1912. Outre sa présence dans de nombreuses institutions spécialisées ou lors d'événements scientifiques[181], Guye se trouve aux premières places des institutions scientifiques suisses. Il est ainsi président de la Société suisse de physique en 1915[182] et 1916, et de la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève en 1916.

Il est certain que Guye, en sa qualité de titulaire de l'unique chaire de physique de l'Université de Genève, est *le* physicien genevois. À ce titre, il occupe une place importante parmi les physiciens suisses. Ainsi, son élection à la présidence de la Société suisse de physique est rapporté comme suit :

> "Cette année aura lieu à Genève la fête du centenaire de la fondation de la Société helvétique des Sciences naturelles. En raison de cette solennité, il est décidé, sur la proposition de M. de Kowalski, de confier la présidence de notre société à un de nos membres genevois. Les suffrages unanimes tombent sur M. Ch.-E. Guye qui, après acceptation, entre immédiatement en fonction."[183]

Guye est également présent dans les revues scientifiques suisses les plus prisées, en tant que Rédacteur en chef des *Archives des sciences physiques et naturelles* de 1919 à 1928 et membre du comité de rédaction de *Helvetica Physica Acta* dont il fut membre fondateur.

Le rayonnement de Guye touche également l'Europe et tout particulièrement la France. Les documents que nous présentons maintenant permettent de mesurer ce rayonnement ainsi que celui de son laboratoire.

180. Ce "*curriculum*" se trouve dans le dossier GUYE conservé aux Archives de l'Académie des Sciences de Paris.

181. Président de la classe d'industrie et de commerce de la Société des arts, vice-président du Comité électrotechnique suisse de la Commission électrotechnique internationale entre 1911 et 1920, président de la Section de physique du groupe "Recherches scientifiques" et vice-président du groupe "Instruments de précision" lors de l'Exposition suisse en 1913...

182. Élu le 1^{er} mai 1915, Guye succède à Pierre Weiss ; *Arch. des sc. phys. et nat.* **39**, 1915, p. 435.

183. *Arch. des sc. phys. et nat.* **39**, 1915, p. 435.

2.3.2.2 Doctorat *honoris causa* de la faculté des sciences de Paris — 1926

En 1926, Guye est nommé docteur *honoris causa* de la faculté des sciences de Paris. Le discours prononcé à cette occasion par son doyen, Charles Maurain, offre un résumé de la carrière de Guye. Ce document est conservé aux archives de l'Académie des sciences de Paris, dans le dossier Guye.

> "Guye fut attaché pendant quelques années à l'École polytechnique fédérale de Zurich ; c'est là qu'il s'occupa des applications de l'électricité. [...] Très rapidement, sa renommée fut grande, et on eut souvent recours à lui pour résoudre des problèmes techniques, en Suisse et à l'étranger ; l'exploitation des tramways de Marseille ayant à cette époque présenté des difficultés, ce fut lui qu'on appela." [184]

Maurain poursuit son discours en rappelant les honneurs reçus par Guye, son frère et Naville pour leurs recherches sur la production des oxydes d'azote.

> "Je rappellerai aussi les travaux sur la synthèse des composés oxygénés de l'azote que Ch. Eug. Guye fit en commun avec son frère Philippe, travaux dont l'importance fut reconnue en France par l'attribution aux auteurs de la grande médaille d'or de notre Société d'Encouragement pour l'industrie nationale, et la médaille Ollivier de Serres, de notre Société d'Agriculture." [185]

Ces premières remarques présentent Guye comme un physicien brillant et reconnu comme tel dès le début de sa carrière, en tout cas avant ses travaux sur l'inertie.

> "En 1900, Guye revint à l'Université de Genève comme professeur et directeur de l'Institut de Physique. Il se consacra dès lors aux recherches, attira près de lui de nombreux travailleurs, et fit de son laboratoire un centre *extrêmement fécond* [186].
>
> On peut dire que presque tous les sujets importants qui préoccupent actuellement les physiciens ont été étudiés par lui ou sous sa direction." [187]

184. Maurain (1926, §. 3).
185. Maurain (1926, §. 4).
186. Guye est à l'origine de la publication régulière à partir de 1906 des *Travaux du laboratoire de physique* regroupant les mémoires publiés par lui et/ou ses collaborateurs. Ces *Travaux* sont envoyés à différentes universités ou écoles suisses, françaises, allemandes ou italiennes. Dans la correspondance de Guye conservée au Musée d'histoire des sciences de Genève, plusieurs lettres, cartes postales ou cartes de visite, envoyées entre le 28 juin 1915 et le 14 août 1926, attestent de la réception de ces livres ou demandent de nouveaux envois. Ces documents sont regroupés sous la référence Z281/2.
187. Maurain (1926, §. 5 ; nous soulignons).

L'appréciation de Maurain est difficile à évaluer. C'est précisément sur ce point que porte notre réflexion.

Le laboratoire de physique de Genève serait devenu, sous l'influence de son directeur, *extrêmement fécond*. Nous avons en effet montré que, malgré des moyens limités, Guye s'est attaché très tôt à diversifier les recherches poursuivies à Genève. Mais l'opinion de Maurain sur la richesse et la fécondité du laboratoire de Guye est exprimée en 1926. Aussi, n'est-elle pas la conséquence de l'impact de l'expérience menée avec Lavanchy ?

> "Il convient de citer tout particulièrement son grand travail sur le rayonnement cathodique et le rayonnement du radium [sic]. [...] Les mesures sont très délicates. Guye les a poursuivies pendant plusieurs années [...] et leur a donné une grande précision. Les variations de masse qu'il a constatées sont en excellent accord avec les formules théoriques de Lorentz et d'Einstein. C'est là un résultat de la plus haute importance." [188]

Dans la suite de ce discours emphatique, Maurain fait allusion aux autres recherches menées par Guye et ses étudiants, dans lesquelles il "fait constamment preuve d'une habileté expérimentale et d'un sens profond des conceptions nouvelles sur la constitution de la matière" [189].

Avant de conclure par des remarques sur l'amitié franco-suisse, Maurain indique (plus ou moins) explicitement les raisons de l'honneur décerné à Guye.

> "J'ai indiqué, bien brièvement, les travaux dont l'importance a conduit la Faculté des Sciences à proposer notre éminent collègue au Conseil de l'Université pour le titre de docteur *honoris causa* [...]" [190]

2.3.2.3 Guye, Correspondant pour la section de physique générale à l'Académie des sciences de Paris

Le 27 janvier 1927, Guye est élu Correspondant de l'Académie des sciences de Paris, par 43 voix contre 3 à J. S. Townsend et 1 à Nils Bohr [191].

Les archives de l'Académie conservent dans le dossier GUYE un "rapport sur les titres et travaux de M. Ch.-Eug. Guye". Il s'agit d'une note manuscrite soumise lors

188. Maurain (1926, §. 6).
189. Maurain (1926, §. 8).
190. Maurain (1926, §. 10).
191. *C.R. Académie des sciences* **184**, p. 181. Townsend sera élu le 14 février et Bohr le 13 décembre 1937.

du "comité secret" du 17 janvier 1927, et rédigé par Aimé Cotton. Comme Maurain 7 ans plus tôt, Cotton donne une place prépondérante aux recherches de Guye sur l'inertie des électrons.

> "Il faut citer en première ligne un travail très étendu dont l'exécution n'a pas duré moins de six ans où il a soumis à des mesures très rigoureuses la question importante de la variation de la masse en fonction de la vitesse. Lorsque M. Guye a commencé à s'en occuper, les recherches déjà faites dans cette direction prêtaient encore à des difficultés et l'on ne pouvait pas considérer la formule de Lorentz-Einstein comme démontrée en toute rigueur. C'est ainsi que dans les expériences de M. Hupka sur les rayons cathodiques de grande vitesse, il aurait suffit d'une erreur d'environ 80 Volts sur la mesure d'un potentiel de décharge de près de 80 000 Volts pour faire coïncider les résultats avec l'une ou l'autre théorie.
> [...] Voilà pourquoi, [...] la section de physique propose à l'unanimité M. Ch.-Eug. Guye pour la première[192] des places de correspondants actuellement vacantes."

À nouveau, Guye apparaît comme ayant réussi à réaliser une expérience difficile et à lui donner une précision inégalée.

2.3.2.4 Autres institutions hors de la Suisse

De 1912 à 1914, Guye est membre non résident au Conseil de la Société française de physique. Il devient ensuite membre correspondant de cette société. Mais son rayonnement ne touche pas uniquement la France. Il est en effet consulté "à plusieurs reprises"[193] par le Comité Nobel pour proposer des noms pour le Prix Nobel de physique[194]. De même, à partir de 1925 et jusqu'en 1934, il est membre du Comité scientifique de l'Institut international de physique Solvay[195]

La présence de Guye au Comité Solvay à partir de 1925 le place parmi les physiciens les plus réputés de cette époque. Les documents précédents ont montré le rôle de ses recherches sur l'inertie des électrons dans la reconnaissance de son travail au laboratoire de physique de l'Université de Genève. Il est raisonnable de penser que c'est à nouveau le cas.

192. Il s'agit de la place laissée vacante par l'élection de Heike Kamerlingh Onnes à la place d'Associé étranger, le 7 décembre 1925. La seconde sera donnée à Townsend.
193. Voir "*curriculum*".
194. Ainsi, il propose en 1920 son compatriote Charles Édouard Guillaume pour le Prix Nobel. Friedman (2005, p. 130).
195. Malade depuis 1929, Guye n'assiste pas aux congrès tenus en 1930 et 1933.

L'appel à Guye par le Comité Nobel permet d'être un peu plus précis. D'après Friedman (2005) le comité est dominé par des physiciens décidés à placer l'expérience et les mesures de précision à la première place en physique.

> "Durant les premières décennies du Prix Nobel, des physiciens suédois avec une forte inclination vers l'expérimentation dominaient le comité. Ils tenaient la mesure de précision comme l'objectif ultime de leur discipline ; ils favorisaient des candidats dont le travail reflétait leurs propres orientations." [196]

Il faudrait pour être plus précis déterminer à partir de quand Guye est appelé par le comité. Néanmoins, cette interprétation permet de concevoir l'appel à l'expertise de Guye comme l'appel à un physicien lui-même spécialiste des expériences de précision.

196. Friedman (2005, p. 129) : "In the early decades of awarding the Nobel Prize, Swedish physicists with a strong experimental bias dominated the committee. They held precision measurement as the highest goal for their disciplines ; they favored candidates whose work mirrored their own orientations."

Conclusion

Charles-Eugène Guye effectue la majeure partie de sa carrière académique en tant que professeur et directeur du laboratoire de physique de l'Université de Genève, entre 1900 et 1930.

Malgré son arrivée dans des conditions difficiles, il parvient donner une forme nouvelle à l'enseignement et à la recherche, plus en conformité avec son domaine de prédilection, l'électricité théorique et appliquée. Il diversifie de plus sa pratique dans le but d'étudier la constitution de la matière, sujet qu'il aborde selon plusieurs axes : phénomènes d'aimantation et d'hystérésis, arc voltaïque, décharge dans les gaz, frottement intérieur des solides. Ces deux derniers thèmes de recherches seront poursuivis jusqu'à sa retraite, le 5 janvier 1930 [197].

Guye pratique une physique fondée sur l'expérience. Celle-ci doit permettre d'observer et mesurer avec la plus grande précision des phénomènes qu'il recherche constamment à maîtriser. Son travail — et celui de ses collaborateurs — repose ainsi de façon invariante sur la mise au point de dispositifs expérimentaux, d'instruments de mesure et de méthodes d'investigation, en vue d'obtenir cette précision et cette maîtrise.

Entre 1907 et fin 1909, il met ainsi au point un dispositif expérimental destiné à mesurer la variation de la masse de l'électron en fonction de sa vitesse. Le discrédit jeté sur les expériences de Kaufmann avait en effet rendu nécessaire la réalisation de nouvelles mesures. Les conclusions de ce travail mené avec Simon Ratnowsky ne sont cependant pas à la hauteur des attentes. Le dispositif ne permet pas d'obtenir la précision nécessaire à la décision entre les formules d'Abraham et de Lorentz-Einstein.

Il reprend donc cette étude après un délai de trois années, dues selon lui au manque de disponibilité résultant de sa nouvelle fonction de Doyen de la Faculté des sciences à partir de 1910. Comme dans ses autres recherches, Guye reprend le dispositif initial auquel il apporte des améliorations. Cette fois, sa conclusion est définitive, la formule de Lorentz-Einstein est confirmée avec la plus grande précision. Nous avons montré dans la partie précédente (1.6.4.2) que les résultats de l'expérience de Guye et Lavanchy sont repris dans de nombreux ouvrages et effectivement considérés comme concluants.

197. Archives du DIP, carton 1985 va 5.3.258.

Guye est aujourd'hui largement ignoré des historiens des sciences [198]. Pourtant, dans les années 1920, il fait figure d'éminent physicien, membre d'institutions prestigieuses, appelé comme expert par le comité Nobel et membre du Conseil scientifique de l'institut Solvay. L'une des questions soulevées dans notre thèse concerne la réception de l'expérience de Guye et Lavanchy. Aussi nous sommes-nous demandé dans quelle meure la reconnaissance de Guye était due à sa "vérification" de la théorie de la relativité restreinte.

Avant la publication de ses résultats en 1915-1916, Guye occupe déjà une position importante au sein de la communauté scientifique suisse. À l'étranger, il est membre de la Société française de physique depuis 1912 et communique régulièrement les résultats de ses recherches dans les *Comptes rendus* de l'Académie des sciences. Ses collègues français de l'Académie des sciences désirent d'ailleurs lui exprimer leur reconnaissance dès "avant la guerre" [199] en le proposant au grade de Chevalier de l'Ordre National de la Légion d'honneur [200].

Cependant, c'est bien *après* la publication de ses résultats et leur accueil favorable que Guye reçoit les distinctions les plus honorifiques. L'estime dont il jouit alors au sein de la communauté scientifique européenne repose sur la qualité de son travail en tant qu'expérimentateur averti. Parmi ses nombreuses recherches, l'expérience menée avec Lavanchy fait figure de réussite majeure.

Les deux conclusions précédentes vont selon nous dans le sens de l'hypothèse formulée plus haut [201] selon laquelle la question de la réception de l'expérience de Guye et Lavanchy doit être posée d'un point de vue lié à leur réalisation, autrement dit d'un point de vue expérimental. S'il est en effet indéniable que cette expérience est à l'origine de la célébrité de Guye, au delà de la position respectable qu'il avait déjà acquise, il ressort de notre étude que c'est toujours la qualité expérimentale dont Guye fait preuve à cette occasion qui est mise en avant.

198. Ceci peut d'ailleurs se comprendre puisque, nous l'avons montré, hormis celles de Kaufmann et de Bucherer, les expériences de dynamique électronique n'ont pas reçu l'attention des historiens.
199. "Liste des personnes qui ont signé la requête", document conservé au Musée d'histoire des sciences de Genève sous la référence Z282/6 n^{o}4.
200. Le décret sera finalement publié le 20 septembre 1920. Ainsi que cela est indiqué sur le titre envoyé à Guye le 5 novembre 1920 et conservé au Musée d'histoire des sciences de Genève sous la référence Z282/6 n^{o}1.
201. Partie 1.6.4.3.

3

Les expériences de Guye sur la variation de l'inertie avec la vitesse (1906-1921)

Sommaire

Introduction **145**

3.1 Publications et évolution des positions de Guye sur la théorie de la relativité **148**

3.1.1 L'expérience de Guye et Ratnowsky — 1907-1910 148

3.1.2 L'expérience de Guye et Lavanchy — 1913-1915 150

3.1.3 Le mémoire de 1921 153

3.1.4 Guye et la relativité 163

3.2 La méthode des trajectoires identiques **168**

3.2.1 Principe général des expériences 168

3.2.2 La méthode des trajectoires identiques selon Guye et Ratnowsky 169

3.2.3 Trajectoires identiques dans un champ magnétique (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 296-297) 171

3.2.4 Trajectoires identiques dans un champ électrique (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 297-298) 172

3.2.5 Principe de la méthode (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 298-299). 173
3.2.6 Détermination de la vitesse absolue des corpuscules (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 299-300) 177
3.2.7 Comparaison avec les formules théoriques (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 300-301 et p. 315) 179
3.3 Nouvel examen de la méthode des trajectoires identiques par Guye et Lavanchy : la méthode des trajectoires presque identiques 181
3.3.1 Modifications apportées au dispositif par Guye et Lavanchy 181
3.3.2 Nouvelle analyse 182
3.3.3 Vitesse des rayons de comparaison et détermination de l'intégrale de champ électrique 184
3.3.4 Les résultats de Guye et Lavanchy 186
3.3.4.1 Présentation des résultats 186
3.3.4.2 Une présentation problématique 189
3.3.4.3 Traitement des grandeurs mesurées 189
3.3.5 Guye, Ratnowsky, Einstein et la méthode des trajectoires identiques 193
Conclusion 196

"*On sait que les rayons cathodiques et les rayons dits β émis par les substances radioactives sont des particules électriquement négatives (électrons) dont l'inertie est très petite et la vitesse très grande. Nous pouvons étudier la loi du mouvement de ces particules de manière très exacte en examinant la déviation de ces rayons dans des champs électriques et magnétiques. [...] Si l'on suppose que les distances relatives entre les masses électriques qui constituent l'électron ne changent pas pendant le mouvement de l'électron (connexion rigide au sens de la mécanique classique), nous arrivons à une loi du mouvement qui ne s'accorde pas avec l'expérience. Suivant un point de vue purement formel, H. A. Lorentz fut le premier à introduire l'hypothèse selon laquelle la forme de l'électron subit une contraction [...] Cette hypothèse, qui n'est justifiable par aucun fait électrodynamique, conduit à cette loi du mouvement qui a été confirmée avec une grande précision ces dernières années.*"[1]

Introduction

L'expérience dite "de Guye et Lavanchy" démarre en avril 1913[2]. Elle est entreprise à la suite de celle "de Guye et Ratnowsky" qui n'avait pas fourni de réponse satisfaisante à la question de la variation de l'inertie de l'électron en fonction de sa vitesse.

Les deux premières parties de notre thèse ont montré la nécessité d'étudier précisément cette expérience afin de mieux comprendre la place qui lui est faite dans la littérature des années 1920 et les nombreux honneurs que Guye en retire.

Pour ce faire, nous disposons de plusieurs sources écrites. En premier lieu nous utilisons les communications brèves que Guye et ses étudiants donnent ou envoient à la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève, à la Société suisse de

1. Einstein (1961, p. 56-57) : "It is known that cathode rays and the so-called β rays emitted by radioactive substances consist of negatively electrified particles (electrons) of very small inertia and large velocity. By examining the deflection of these rays under the influence of electric and magnetic fields, we can study the law of motion of these particles very precisely. [...] If we now assume that the relative distances between the electrical masses constituting the electron remain unchanged during the motion of the electron (rigid connection in the sense of classical mechanics), we arrive at a law of motion of the electron which does not agree with experience. Guided by purely formal point of view, H. A. Lorentz was the first to introduce the hypothesis that the form of the electron experiences a contraction [...] This hypothesis, which is not justifiable by any electrodynamical facts ; supplies us then with that particular law of motion which has been confirmed with great precision in recent years."
2. Guye (1921, p. 276).

physique et à l'Académie des sciences de Paris. Celles-ci permettent déjà de suivre l'évolution des résultats et donc de la réalisation de l'expérience. De plus, leur format ne permettant pas aux auteurs de détailler toute l'expérience, seul un aspect bien défini est abordé. Cela nous offre la possibilité de montrer ce qui, aux yeux de Guye, revêt une importance particulière. Enfin, l'évolution des intitulés de ces communications souligne l'évolution de la pensée de Guye.

En second lieu, chaque expérience a donné lieu à un article de synthèse plus long et plus détaillé, respectivement en 1911 et 1916. C'est alors que le dispositif expérimental et le déroulement de l'expérience sont décrits. C'est également le lieu où sont publiés et analysés les résultats définitifs. C'est à partir de ces articles que nous avons abordé les expériences de Guye, Ratnowsky et Lavanchy. Ces articles sont presque totalement identiques aux thèses respectives de Ratnowsky et Lavanchy.

Enfin, en 1921 est publié un mémoire de synthèse dans lequel Guye reprend largement les articles 1911 et 1916 auxquels il ajoute une introduction sur la question de l'inertie et qu'il complète par "des tableaux où figurent les résultats définitifs, les données directes de l'observation qui ont servi à les établir" [3]. La date de publication de ce mémoire est postérieure de deux ans environ à celle de sa rédaction, comme l'indique Guye dans la partie de l'introduction datée du 30 juin 1921 et la citation suivante, tirée de la séance du 5 décembre 1918 à la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève :

> "A l'occasion d'un mémoire en cours de publication [4] sur la vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein [5], M. C.-E. Guye a calculé diverses tables [...]" [6]

Étudier la façon dont Guye et ses étudiants rendent compte de leur travail expérimental nous permet également de suivre, sinon de comprendre, l'évolution de la pensée de Guye sur la théorie de la relativité. Un complément alors intéressant est constitué par les quelques articles que Guye écrit sur le sujet et, surtout, par la correspondance qu'il entretient avec Einstein depuis 1909, dont une partie est publiée dans les volumes 5, 8, 9 et 10 des *Collected papers of Albert Einstein* et quelques lettres encore inédites sont conservées au musée d'histoire des sciences de Genève. La correspondance d'Einstein révèle également des informations sur la relation qu'il

3. Guye (1921, p. 277).
4. Ici, une note renvoie à la référence du mémoire en question, identique à celle du mémoire publié deux ans et demi plus tard.
5. C'est le titre exact du mémoire de 1921.
6. Guye (1918, p. 81).

entretient avec Guye et sur son intérêt pour ses expériences.

Dans cette partie, nous présentons les publications de Guye, Ratnowsky et Lavanchy entre 1907 et 1921. Cela permet de percevoir comment la position de Guye face à la relativité évolue dans les années 1910 et de comprendre comment son travail *devient* à ses yeux un test de la théorie de la relativité. Ensuite, nous présentons dans le détail la méthode expérimentale originale mise au point et suivie par Guye et ses étudiants — la méthode dite des trajectoires identiques, à la base selon Guye du succès de ses recherches.

3.1 Publications et évolution des positions de Guye sur la théorie de la relativité

3.1.1 L'expérience de Guye et Ratnowsky — 1907-1910

La première communication de Guye et Ratnowsky sur le travail commencé en 1907 date du 1^{er} juillet 1909, lors d'une séance de la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève[7]. Par la suite, Guye et Ratnowsky affirment que les premiers résultats ont été présentés devant la même société le 6 juillet[8]. Nous n'avons trouvé aucune référence à cette présentation dans les comptes rendus de séance publiés dans les *Archives*. Le compte rendu de la séance du 1^{er} juillet est très bref :

> "MM. Ch.-Eug. Guye et Ratnowsky présentent un travail sur *l'inertie électromagnétique des rayons cathodiques de grande vitesse*, qui paraîtra prochainement dans les *Archives*."[9]

Il faut ensuite attendre le 27 décembre 1909 pour que Guye et Ratnowsky procèdent à l'envoi de résultats expérimentaux à la Société de physique et d'histoire naturelle. Ce communiqué est intitulé *Sur la variation de l'inertie des corpuscules cathodiques en fonction de leur vitesse et sur le principe de relativité*[10]. Il est lu par Guye lors de la séance du 6 janvier 1910. Celui-ci affirme alors que, en juillet déjà, les "premiers résultats [...] concluaient à la supériorité de la formule de Lorentz sur celle d'Abraham"[11], et que les "résultats que nous communiquons aujourd'hui ont confirmé pleinement cette manière de voir"[12]. Les résultats de juillet ne sont pas publiés. En janvier, ils le sont sous la forme d'un tableau qui résume 27 séries d'expériences. D'après ce tableau,

> "La formule de Lorentz est vérifiée dans la limite des erreurs d'expérience ; les divergences avec la formule d'Abraham dépassent ces limites."[13]

Malgré le titre de ce communiqué, la version publiée ne mentionne ni le "principe de relativité", ni le nom d'Einstein.

7. Guye et Ratnowsky (1909).
8. Guye et Ratnowsky (1910b, p. 340), Guye et Ratnowsky (1911, p. 293 ; note 1), Ratnowsky (1911, p. 5 ; note 1).
9. Guye et Ratnowsky (1909, italiques originales).
10. Guye et Ratnowsky (1910b).
11. Guye et Ratnowsky (1910b, p. 340).
12. Guye et Ratnowsky (1910b, p. 340).
13. Guye et Ratnowsky (1910b, p. 340).

Le 7 février suivant, une note datée du 10 janvier et portant le même titre est présentée devant l'Académie des sciences de Paris [14]. Elle est plus détaillée que la précédente puisqu'elle contient des informations sur le dispositif et la méthode expérimentale nommée *méthode des trajectoires identiques*. Les résultats présentés sont identiques à ceux présentés la semaine précédente à Genève. Mais, la conclusion n'est plus aussi catégorique.

> "Nous avons effectué jusqu'ici 27 séries de mesures. [...]
> Le tableau suivant permet de comparer $\frac{\mu'}{\mu_0}$ à la valeur calculée $\left(\frac{\mu'}{\mu_0}\right)$ dans les deux hypothèses. [...]
> Il résulte de ces chiffres que des deux formules proposées, *celle de Lorentz paraît seule donner des résultats compatibles avec l'expérience*. Les divergences avec la formule d'Abraham atteignent presque 4 pour 100, alors qu'avec la formule de Lorentz elles sont d'environ 1 à 2 pour 100. En outre, sur les 27 séries d'observations, l'expérience donne 16 écarts positifs et 11 écarts négatifs (formule de Lorentz) pour 26 écarts positifs et 1 écart négatif (formule d'Abraham).
> Comme dans les mesures de M. Bucherer et de M. Hupka, le principe de relativité se trouve en accord avec l'expérience." [15]

Guye a-t-il parlé à Genève du "principe de relativité"? Nous ne le savons pas. Nous voyons en revanche que si c'est le cas à Paris, il ne le mentionne que de façon très brève, en fin de note et toujours sans citer le nom d'Einstein.

Il faut ensuite attendre plus d'un an pour voir publier l'article complet sur l'expérience de Guye et Ratnowsky, en avril 1911. Le titre a été modifié, il ne fait plus référence au "principe de relativité" : *Détermination expérimentale de la variation d'inertie des corpuscules cathodiques en fonction de la vitesse* [16]. Dans cet article, Guye et Ratnowsky inscrivent leur recherche dans le cadre de la théorie de l'électron.

> "On sait que les conceptions électroniques actuelles ont amené les physiciens à considérer la masse (coefficient d'inertie) comme une fonction de la vitesse. Mais pour choisir entre les différentes théories proposées, il est nécessaire de rechercher par l'expérience quelle est la loi de cette variation d'inertie." [17]

Les théories en question sont celle d'Abraham "appelée aussi théorie de l'électron sphérique indéformable" [18] et celle de "Lorentz (Lorentz-Einstein) dont le caractère

14. Guye et Ratnowsky (1910a).
15. Guye et Ratnowsky (1910a, p. 328-329 ; nous soulignons).
16. Guye et Ratnowsky (1911).
17. Guye et Ratnowsky (1911, p. 293).
18. Guye et Ratnowsky (1911, p. 293-294).

essentiel est comme on sait de satisfaire au principe de relativité" [19].

Après avoir présenté la méthode des trajectoires identiques, le détail du dispositif expérimental et les mesures effectuées, Guye et Ratnowsky proposent leur conclusion. Celle-ci commence par un rappel des conditions de l'expérience, justification selon eux de la valeur de leur travail. Ils continuent en concédant que la méthode suivie comporte une source d'incertitude importante dans le pointé de l'impact des électrons sur le fond du tube. Néanmoins, ils concluent que "la théorie de l'électron indéformable ne donne pas en moyenne des résultats conformes à l'expérience pour les grandes vitesses" [20]. De plus, "les résultats de [leur] travail ne sont pas assez précis pour *infirmer* la formule de Lorentz-Einstein" [21]. Selon eux, les écarts entre les mesures et la formule de Lorentz-Einstein sont "dans la limite des erreurs d'expérience" [22]. Enfin,

> "[...] *des deux formules proposées, celle de Lorentz-Einstein est la seule qui donne, pour les rayons cathodiques de grande vitesse, des résultats compatibles avec la moyenne de nos expériences.*" [23]

L'expérience de Guye et Ratnowsky n'est pas concluante, ce qui n'empêche pas le second de voir sa thèse acceptée par le Conseil de la faculté des sciences le 17 juillet 1910 [24] et publiée en 1911 [25]. Il s'agit de la copie conforme de l'article précédent, avec un appendice donnant les mesures qui ont servi au calcul des couples (v,μ).

3.1.2 L'expérience de Guye et Lavanchy — 1913-1915

Deux ans après la dernière publication de Guye et Ratnowsky, Guye décide de reprendre ce travail inachevé. Il fait alors travailler un second étudiant, Charles Lavanchy. Selon Guye [26] et Lavanchy [27], cette expérience démarre en avril 1913.

Le 2 septembre 1914 devait avoir lieu à Berne la séance annuelle de la Société suisse de physique. Celle-ci est annulée, du fait des récentes déclarations de guerre

19. Guye et Ratnowsky (1911, p. 294).
20. Guye et Ratnowsky (1911, p. 320).
21. Guye et Ratnowsky (1911, p. 321 ; nous soulignons).
22. Guye et Ratnowsky (1911, p. 321).
23. Guye et Ratnowsky (1911, p. 321 ; italiques originales).
24. Voir Procès Verbaux des séances du Conseil de la faculté des sciences, Dépôt des bibliothèques universitaires, Genève. Volume 1984/22/82.
25. Ratnowsky (1911).
26. Guye (1921, p. 276).
27. Lavanchy (1917, p. 4).

du mois d'août [28]. À cette occasion, Guye et Lavanchy avaient prévu de présenter les premiers résultats de leur travail. Cette communication est intitulée *Inertie des électrons cathodiques de grande vitesse* [29]. Ils font part de "perfectionnements [...] apportés à la méthode" qui ont permis de s'affranchir des difficultés soulignées par Guye et Ratnowsky trois ans plus tôt. Ils affirment de plus

> "Les premiers résultats obtenus concorde [sic] à 1/2 % environ avec la formule de Lorentz-Einstein et cela pour des vitesses comprises entre 130,000 et 140,000 kilomètres à la seconde." [30]

L'été suivant, Guye et Lavanchy font trois communications de leurs résultats. La première à lieu le 1^{er} juillet 1915 à la Société de physique et d'histoire naturelle. Le titre est déjà celui définitif de *Vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein par les rayons cathodiques de grande vitesse* [31]. Les auteurs présentent les "conclusions très précises auxquelles cette étude a conduit" [32]. En fait, le tableau présenté par Guye et Lavanchy est annoncé comme un tableau de résultats "préliminaires" [33]. Il comporte 17 points pour des vitesses comprises entre $\beta = 0{,}2581$ et $\beta = 0{,}4829$. La conclusion est cependant déjà exprimée avec force :

> "Les résultats obtenus jusqu'ici sont résumés dans le tableau de la page précédente, qui vérifie d'une façon tout à fait remarquable la formule de Lorentz-Einstein sur la variation d'inertie en fonction de la vitesse." [34]

Onze jours plus tard, une note au titre identique est présentée à l'Académie des sciences de Paris [35]. Elle n'est pas beaucoup plus détaillée que la précédente en ce qui concerne le dispositif et la méthode, mais elle comporte le tableau de mesure définitif et le premier cliché publié de cette expérience. Le tableau comporte cette fois 25 points. Les 14 premiers et le dernier sont identiques à ceux du tableau présenté plus tôt à Genève, dont Guye et Lavanchy en ont enlevé 2 [36]. À la place, ils en ajoutent 10 compris entre $\beta = 0{,}3972$ et $\beta = 0{,}4714$. La conclusion est similaire à celle proposée précédemment :

28. Dans les *Cahiers du laboratoire* de 1916, fascicule 3, Guye publie la liste des publications qui devaient être présentés lors de cette séance. En note, il précise que "[l]a session de la Société Helvétique n'ayant pu avoir lieu par suite de la guerre le texte des communications a été adressé à M. le Président central avant le 1^{er} octobre 1914".
29. Guye et Lavanchy (1915a).
30. Guye et Lavanchy (1915a).
31. Guye et Lavanchy (1915b).
32. Guye et Lavanchy (1915b, p. 167).
33. Guye et Lavanchy (1915b, p. 167).
34. Guye et Lavanchy (1915b, p. 167).
35. Guye et Lavanchy (1915c).
36. Il s'agit des points $\beta = 0{,}4164$ et $\beta = 0{,}4703$.

> "On voit par ce Tableau, que *la formule de Lorentz-Einstein sur la variation de l'inertie en fonction de la vitesse se trouve vérifiée avec une très grande exactitude par l'ensemble de nos mesures.*
>
> La répartition à peu près indifférente des écarts positifs et négatifs, jointe au grand nombre des déterminations effectuées, semble bien indiquer que la formule de Lorentz-Einstein représente une loi très exacte et que des déterminations, même individuellement plus précises, ne parviendraient pas à la mettre en défaut." [37]

La troisième communication a lieu lors de la séance annuelle de la Société suisse de physique, le 14 septembre 1915 [38]. Hormis le cliché qui ne figure pas dans le compte rendu publié dans les *Archives*, il s'agit de la copie de la communication du 12 juillet à Paris.

Comme dans le cas de l'expérience de Ratnowsky, il faut attendre ensuite un an pour que soit publié l'article détaillé présentant cette recherche [39]. La présentation est relativement similaire à celle de Ratnowsky cinq ans plus tôt. Après un rappel rapide des théories, les auteurs proposent un historique des recherches antérieures. Ensuite, ils présentent la méthode, le dispositif et les mesures effectuées. Ils présentent le même cliché qu'un an plus tôt à l'Académie des sciences de Paris. Enfin, la conclusion rappelle les points forts de l'expérience et reprend presqu'à l'identique la conclusion formulée en 1915 [40].

Dans leur présentation des théories, Guye et Lavanchy opèrent un retournement par rapport à ce qu'écrivait le premier cinq ans plus tôt.

> "Dans les théories actuelles, la masse ou coefficient d'inertie des corpuscules en mouvement est considérée comme une quantité variable, fonction de la vitesse. Cette variation du coefficient d'inertie se met généralement sous la forme

$$\mu = \mu_0 \Phi(\beta) \tag{3.1}$$

37. Guye et Lavanchy (1915c, p. 55).
38. Guye et Lavanchy (1915d).
39. Guye et Lavanchy (1916).
40. "En résumé, il ressort des tableaux et du graphique qui précèdent, ainsi que des considérations que nous venons de développer, que *la formule de Lorentz-Einstein relative à la variation de l'inertie en fonction de la vitesse se trouve vérifiée avec une grande exactitude par l'ensemble de nos mesures.* La répartition à peu près indifférente des écarts positifs et négatifs, jointe au grand nombre des mesures effectuées, semble bien indiquer, en outre, que la formule de Lorentz-Einstein représente une loi très exacte que des déterminations individuellement plus précises ne parviendraient pas aisément à mettre en défaut", (Guye et Lavanchy, 1916, p. 448 ; italiques originales).

> μ_0 désignant la masse d'un corpuscule infiniment lent ; μ, la masse d'un corpuscule de vitesse β ; cette vitesse étant rapportée à celle de la lumière prise comme unité.
>
> Généralement on détermine cette fonction Φ en faisant des hypothèses particulières sur la nature de l'électron. A ce propos, deux théories, celle d'Abraham et celle de Lorentz-Einstein, ont été plus particulièrement envisagées. [41]

Ce ne sont plus les "conceptions électroniques" qui ont conduit à la relation 3.1. Il est au contraire désormais acquis, "dans les théories actuelles", que la masse varie avec la vitesse. Les hypothèses électroniques ne servent alors plus qu'à déterminer la fonction Φ, la loi de variation. Les auteurs emploient également davantage l'expression "théorie de Lorentz-Einstein", tout faisant explicitement la distinction entre les théories de Lorentz et d'Einstein. Le premier a fait une hypothèse sur la nature de l'électron, le second a "montré que le *principe de relativité* conduit à une variation de masse des corpuscules identique à celle donnée par la théorie de Lorentz" [42].

Cependant, en avril 1916 [43], Guye envisage encore son travail plutôt comme une contribution à la théorie de l'électron.

> "L'importance, *pour l'établissement des théories électroniques*, de la vérification de l'une ou de l'autre de ces hypothèses explique et justifie les recherches effectuées depuis plusieurs années, soit sur les rayons β du radium, soit sur les rayons cathodiques de grande vitesse." [44]

Tout en mentionnant davantage et plus précisément la théorie de la relativité restreinte, il se montre prudent sur le plan théorique. Ses conclusions portent uniquement sur la validité de la "formule de Lorentz-Einstein". Il ne formule, comme en 1911, aucun avis explicite sur le principe de relativité. La thèse de Lavanchy, copie presque conforme à cet article, ne propose pas davantage de positionnement théorique entre la théorie de l'électron de Lorentz et la relativité d'Einstein.

3.1.3 Le mémoire de 1921

Dès 1916, Guye a pour projet de publier l'ensemble des "données d'expériences" dans les *Mémoires de la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève* [45]. Il

41. Guye et Lavanchy (1916, p. 286).
42. Guye et Lavanchy (1916, p. 287 ; italiques originales).
43. La thèse de Lavanchy est rédigée en avril 1916, comme indiqué par les remerciements qu'il adresse à Guye. Lavanchy (1917, p. 4).
44. Guye et Lavanchy (1916, p. 287 ; nous soulignons).
45. "Nous ne pouvons dans un périodique faire figurer le relevé complet des diverses données d'expériences qui ont servi à établir ces deux tableaux ; elles seront publiées d'ailleurs dans les

faut attendre 1921 pour que celui-ci voit le jour.

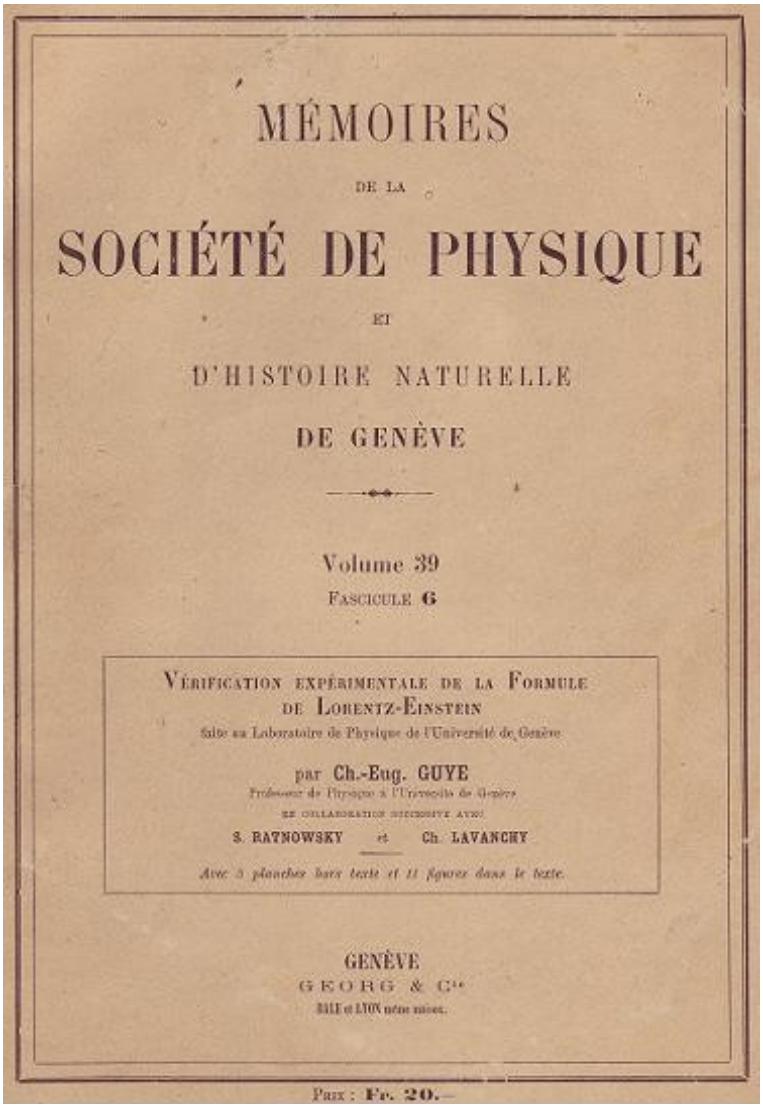
MÉMOIRES
DE LA
SOCIÉTÉ DE PHYSIQUE
ET
D'HISTOIRE NATURELLE
DE GENÈVE
Volume 39
FASCICULE 6
VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DE LA FORMULE DE LORENTZ-EINSTEIN
Faite au Laboratoire de Physique de l'Université de Genève
par Ch.-Eug. GUYE
Professeur de Physique à l'Université de Genève
EN COLLABORATION DÉCISIVE AVEC
S. RATNOWSKY et Ch. LAVANCHY
Avec 3 planches hors texte et 11 figures dans le texte.
GENÈVE
GEORG & Cie
BÂLE et LYON même maison.
PRIX : Fr. 20.—

FIGURE 3.1 – Couverture du mémoire de 1921 GUYE (1921)

L'avant-propos

Ce mémoire est structuré comme suit. Guye rédige en juin 1921 un "avant-propos" dans lequel il expose les motivations qui l'ont amené à entreprendre ces recherches.

Mémoires de la Société de Physique et d'Histoire naturelle de Genève avec la discussion détaillée des résultats". GUYE et LAVANCHY (1916, p. 442).

Selon lui, les critiques dont font l'objet les expériences de Kaufmann puis celles de Bucherer sont à l'origine de son travail.

> "L'idée me vint alors de chercher à attaquer le problème par l'étude des rayons cathodiques de grande vitesse." [46]

Il présente immédiatement après la méthode des trajectoires identiques comme sa contribution à l'étude de la variation de l'inertie des électrons produits par émission cathodique.

> "[...] la production de ces rayons, que l'on ne peut obtenir que dans des vides très poussés, présente du point de vue expérimental de sérieuses difficultés. En outre, il faut faire le choix d'une méthode qui permette avec une exactitude aussi grande que possible de déceler la différence entre les deux théories. Après examen attentif des dispositifs les mieux appropriés au but à atteindre, je me suis arrêté à la méthode que j'ai appelée *méthode des trajectoires identiques* [...]" [47]

Il rappelle ensuite les résultats obtenus avec Ratnowsky. Après une première interprétation des mesures favorable à la formule de Lorentz, l'"examen approfondi des résultats" [48] montre que, si la formule d'Abraham est "nettement en désaccord avec l'expérience" [49], la "formule de Lorentz-Enstein" [50] n'est pas vérifiée avec une "exactitude suffisante" [51].

C'est la raison qu'il invoque pour justifier les nouvelles recherches entreprises avec Lavanchy. Parmi les "importants perfectionnements" [52] qu'ils apportent au dispositif initial, Guye retient principalement l'enregistrement photographique venant se "substituer à l'observation directe des déviations" [53].

L'avant-propos se termine par l'annonce du plan du mémoire.

Dynamique des grandes vitesses

Guye rédige ensuite un chapitre qu'il intitule "dynamique des grandes vitesses". Il reprend de façon explicite la présentation de Langevin dans *L'inertie de l'énergie*

46. Guye (1921, p. 274).
47. Guye (1921, p. 274 ; italiques originales).
48. Guye (1921, p. 275).
49. Guye (1921, p. 275).
50. Guye (1921, p. 275-276).
51. Guye (1921, p. 276).
52. Guye (1921, p. 276).
53. Guye (1921, p. 276).

et ses conséquences [54] sur les trois définitions de la masse. Il rappelle que, "dans la mécanique newtonienne" [55] les trois définitions de la masse coïncident. En revanche, la théorie électromagnétique amène à modifier ce point de vue.

À nouveau, l'inspiration de Langevin se fait sentir. Comme lui en effet, il introduit l'inertie électromagnétique en interprétant l'énergie magnétique créée par la mise en mouvement (à faible vitesse) d'une sphère chargée comme une énergie cinétique. En revanche, il procède différemment dans le cas des vitesses élevées. Langevin part de l'impulsion de la particule pour obtenir les formules générales donnant les masses longitudinales et transversales en fonction de celle-ci. Guye raisonne à partir de l'énergie électromagnétique totale d'un électron en mouvement. Il précise que son raisonnement ne tient d'ailleurs que dans le cas d'un électron indéformable [56], c'est-à-dire dans le cadre de la théorie d'Abraham. Il en rappelle ensuite les formules exactes puis développées en série.

Il oppose ensuite ce qu'il appelle la "mécanique électromagnétique" à la "mécanique de la relativité".

> "Toutefois, les formules (I) que nous venons de rappeler ne parurent pas définitives et le principe de relativité devait avoir pour conséquence non seulement de les modifier, mais surtout de les simplifier." [57]

Guye ne présente pas le "principe de relativité" mais rappelle que les expériences ne permettent pas de déceler le mouvement rectiligne uniforme "auquel participent l'observateur et tous les corps en expérience" [58]. L'hypothèse de contraction de Lorentz (et Fitzgerald) permet de rendre compte de cette impossibilité et Poincaré a montré que la contraction de l'électron pouvait être expliquée par une pression exercée par l'éther. Mais Guye insiste sur le caractère hypothétique de cette pression et rappelle :

> "D'ailleurs que cette contraction soit le résultat d'une pression hypothétique de l'éther (Poincaré) ou qu'on l'envisage comme une simple conséquence des modifications que le principe de relativité impose aux notions que nous nous faisons du temps et de l'espace, elle a pour effet d'introduire dans le problème électromagnétique d'une charge en mouvement une modification importante qui se répercute sur les différentes formules.

54. Langevin (1950b).
55. Guye (1921, p. 278).
56. Voir à ce sujet Partie 1.4.1.
57. Guye (1921, p. 281).
58. Guye (1921, p. 281).

> Si l'on tient compte de cette déformation et que l'on effectue le calcul des diverses masses, on obtient alors les expressions (II) (Lorentz-Einstein) considérablement plus simples que les formules (I) [d'Abraham]." [59]

Cette hésitation entre principe de relativité et théorie électromagnétique persiste dans toute l'introduction de Guye. Ainsi, il étend d'une part les formules de Lorentz-Einstein des électrons aux autres corps dont les atomes "seraient constitués uniquement par l'association de charges électriques positives et négatives" [60] soumises à des interactions électromagnétiques. Mais d'autre part, "[o]n peut également considérer ces formules comme une conséquence du principe de relativité" [61]. Il poursuit :

> "Envisagées de la sorte [62], elles prennent alors une portée beaucoup plus générale et deviennent la base d'une mécanique nouvelle et plus complète que celle que nous possédons depuis Galilée et Newton ; la *mécanique des grandes vitesses* ou la *mécanique de la relativité* dont les équations fondamentales [63] sont
>
> $$X = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}$$
> $$Y = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}$$
> $$Z = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}$$
>
> équations qui se confondent avec celles de la mécanique rationnelle classique dans le cas particulier où β^2 devient négligeable, c'est-à-dire lorsque la vitesse de déplacement du corps reste petite par rapport à l'énorme vitesse de la lumière." [64]

Ainsi, Guye maintient une double explication (électromagnétique et relativiste) pour généraliser les formules de Lorentz-Einstein à tous les corps, mais concède à la théorie de la relativité une "portée beaucoup plus générale", du fait du caractère hypothétique de ce qui est en fait chez Guye l'expression du programme réductionniste électromagnétique de Wien, Abraham et Kaufmann vingt ans plus tôt. Il va en

59. Guye (1921, p. 283).
60. Guye (1921, p. 284).
61. Guye (1921, p. 284).
62. Selon le principe de relativité.
63. Ici, Guye note par X, Y et Z les composantes de la force selon les trois directions cartésiennes. Or, il se trompe en considérant le facteur $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ puisque c'est un facteur γ^3 qui doit intervenir pour deux des composantes (voir Partie 1.5.1).
64. Guye (1921, p. 284).

fait plus loin quelques lignes après en faisant référence à d'autres conséquences du "nouveau principe"[65] dont il n'explicite que celle selon laquelle "[l]'inertie d'un corps serait proportionnelle à son contenu d'énergie"[66].

Il présente alors ses recherches sur les rayons cathodiques comme ayant apporté la confirmation de cette conséquence.

> "Nous nous permettrons dans cette introduction d'en rappeler une des plus importantes en vertu même de la confirmation que lui ont apportée nos expériences.
>
> [...]
>
> Mais, si cette conséquence des formules de Lorentz-Einstein ne peut être à l'heure actuelle vérifiée directement par la balance, la dynamique des électrons peut en fournir une preuve indirecte."[67]

Pour justifier le caractère de "preuve indirecte" de ses expériences, Guye fait le raisonnement suivant. Si l'énergie d'un corps en mouvement E est donnée par la relation $E = \mu V^2$[68], alors la différence entre l'énergie du corps en mouvement et celle du corps immobile est égale à $\mu V^2 - \mu_0 V^2$. Et si la formule de Lorentz-Einstein est correcte, cette différence est égale à $\frac{1}{2}(\mu)v^2$[69], qui est l'énergie cinétique du corps en mouvement.

> "En résumé *la vérification de la formule de Lorentz-Einstein pour les électrons de grande vitesse, constitue du même coup une vérification expérimentale indirecte de premier ordre de la relation* $mV^2 = E$ *qui réunit en un seul principe le principe de la conservation de l'énergie et celui de la conservation de la matière.*"[70]

Mise en valeur de son travail par Guye

Guye termine enfin cet exposé sur la dynamique des grandes vitesses en présentant les expériences précédentes comme trop peu précises.

> "Or, si l'on réfléchit à l'importance de ces vérifications, on reste surpris de la facilité avec laquelle nombre de physiciens ont admis la validité des formules de la relativité pour les charges en mouvement, avant même qu'elles aient été

65. Guye (1921, p. 285).
66. Guye (1921, p. 285).
67. Guye (1921, p. 285-286).
68. V est la vitesse de la lumière dans le vide et μ la masse transversale du corps.
69. (μ) est la masse "cinétique" et v la vitesse du corps.
70. Guye (1921, p. 286 ; italiques originales).

> effectivement vérifiées par l'expérience. En effet, les expériences effectuées jusqu'ici sur les rayons cathodiques permettaient tout au plus de conclure que les résultats n'étaient pas en contradiction avec ces formules.
>
> Pour quiconque veut bien se donner la peine d'analyser les divers travaux qui ont été effectués dans ce domaine, il est aisé de se rendre compte du peu de précision obtenu dans la plupart de ceux que l'on cite le plus souvent.
>
> Comment sur un cliché "grand comme l'ongle" peut-on par ex. avec quelque certitude, déterminer par des procédés photométriques l'équation d'une courbe qui s'y trouve trace assez peu nettement [71] ? Comment garantir qu'un potentiel de 80 000 volts a été mesuré à ±80 volts, alors que cette différence suffit à valider la formule d'Abraham ou celle de Lorentz-Einstein [72]. Vraiment pour considérer ces vérifications comme satisfaisantes il faut être animé, semble-t-il, d'un très vif désir de voir les faits corroborer des hypothèses séduisantes. On croit facilement ce qu'on désire, a-t-on coutume de dire ; c'est une vérité à laquelle n'échappent pas plus les physiciens que les autres hommes.
>
> Mais il convient d'ajouter que cette tendance à exagérer la précision des résultats obtenus est surtout marquée chez les physiciens qui ne sont pas spécialisés dans ces recherches délicates ; les auteurs même des mémoires ont été bien souvent moins catégoriques que ceux qui les citent." [73]

Après cette présentation de ses recherches comme importantes d'un point de vue théorique et nécessaires d'un point de vue expérimental, Guye reprend la présentation historique des expériences de Kaufmann, Bucherer, Neumann, Starke, Proctor, Hupka, Guye et Ratnowsky, et Jones, telle qu'elle est faite dans l'article de 1916 avec Lavanchy.

Puis il reprend la parole en son nom propre pour proposer "quelques remarques très générales qui résultent de [leur] expérience personnelle du sujet et sans lesquelles une saine critique ne peut à [leur] avis s'exercer judicieusement" [74]. Il fait ressortir quatre points sur lesquels porter son attention : la prise en compte des inhomogénéités des champs électrique et magnétique de déviation, la mesure des potentiels élevés, l'annulation des effets du champ magnétique terrestre et des effets électrostatiques parasites. Ces aspects expérimentaux sont pour Guye à l'origine du caractère "douteu[x]" des expériences antérieures sur les rayons cathodiques. Là encore, il se présente comme celui qui a su le mieux tenir compte de ces considérations.

> "Beaucoup d'expériences sont douteuses et si la théorie de Lorentz-Einstein

71. Guye fait référence à la critique des conclusions de Kaufmann.
72. Ici, ce sont les expériences de Hupka qui sont visées.
73. Guye (1921, p. 286-287).
74. Guye (1921, p. 291).

> n'a pas tardé à trouvé plus de résultats en sa faveur, c'est peut-être aussi en partie qu'elle est plus suggestive et qu'en vertu même de son prestige on a eu jusqu'ici plus de hâte à publier les résultats qui la confirment que ceux qui l'infirmeraient."[75]

Le corps du mémoire

Après cette longue introduction, Guye propose de larges extraits des articles rédigés avec Ratnowsky en 1911 et Lavanchy en 1916. Comme annoncé dans ce dernier travail, il donne alors à lire l'ensemble des données expérimentales retenues pour calculer les couples $(v\,;\mu)$ et obtenues sur quelques 220 clichés photographiques[76].

Pour nous, toutes ces données revêtent un intérêt particulier puisque les clichés sont numérotés de façon chronologique. Ils nous permettent ainsi d'affirmer que les mesures entre 130 et 140 kV dont Guye et Lavanchy se servent en 1914 pour affirmer que les mesures se laissent déjà interpréter en faveur de la formule de Lorentz-Einstein, n'ont finalement pas été utilisées. En effet, parmi celles retenues à la fin, les mesures pour des vitesses si élevées n'ont été réalisées que dans les tous derniers moments de l'expérience.

La publication de ces mesures permet également de procéder à une analyse des données dans laquelle, en suivant la méthode de Guye, il est possible de calculer les écarts moyens de toutes les moyennes effectuées dans l'interprétation des mesures[77].

En appendice, Guye rappelle les principales formules auxquelles aboutissent les théories d'Abraham et de "Lorentz-Einstein". Il donne de plus des tableaux des valeurs numériques des rapports des différentes masses à la masse au repos pour des valeurs de β comprises entre 0 et 1, par pas de 0,05. Il précise que certaines valeurs ont été calculées par le développement en série des formules, alors que d'autres, pour des vitesses supérieurs à $\beta = 0,15$ ont été calculées grâce aux "tables de logarithmes à sept décimales"[78].

Enfin, le mémoire contient trois planches. La première est une reproduction photographiée du dispositif (Fig. 3.2). La seconde montre la "table d'expérience" (Fig. 3.3). La troisième propose deux clichés différents qui illustrent selon Guye la stabilité de l'émission cathodique au cours d'une expérience (Fig. 3.4).

75. Guye (1921, p. 292).
76. Il n'est pas possible de déterminer avec précision le nombre de clichés car certains contiennent des déviations pour des vitesses différentes.
77. Nous y revenons par la suite ; voir 3.3.4.3.
78. Guye (1921, p. 362 par exemple).

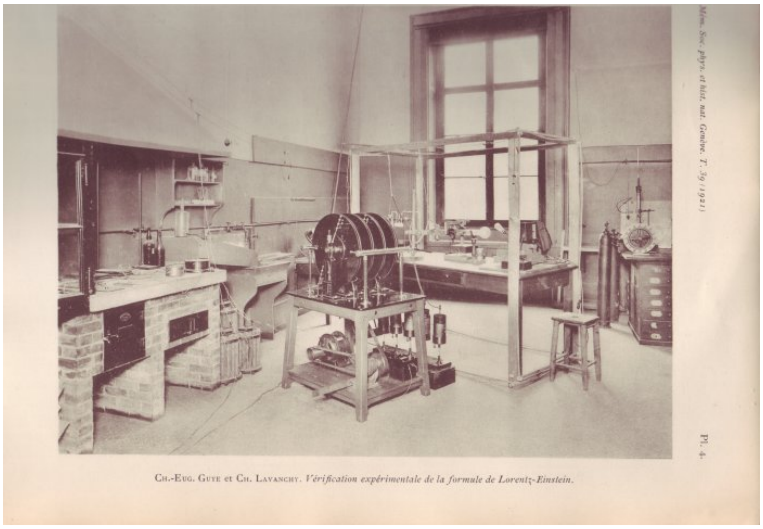

FIGURE 3.2 – Photographie du dispositif expérimental (GUYE, 1921, Planche 4)

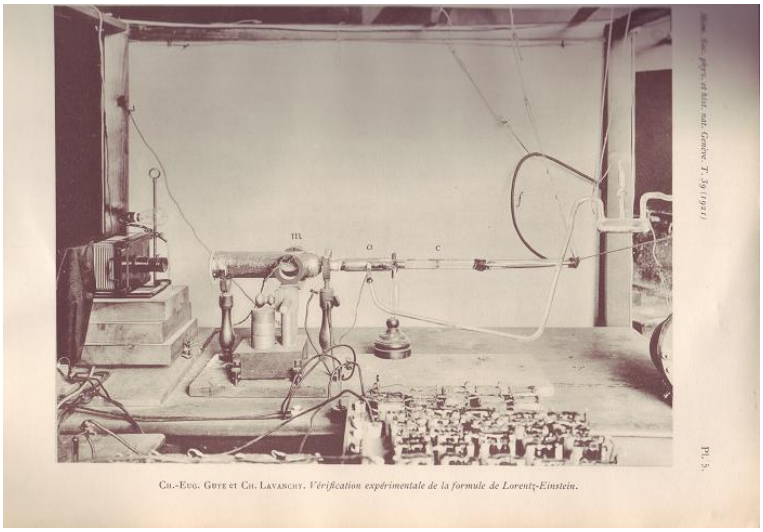

FIGURE 3.3 – Photographie de la table d'expérience (GUYE, 1921, Planche 5)

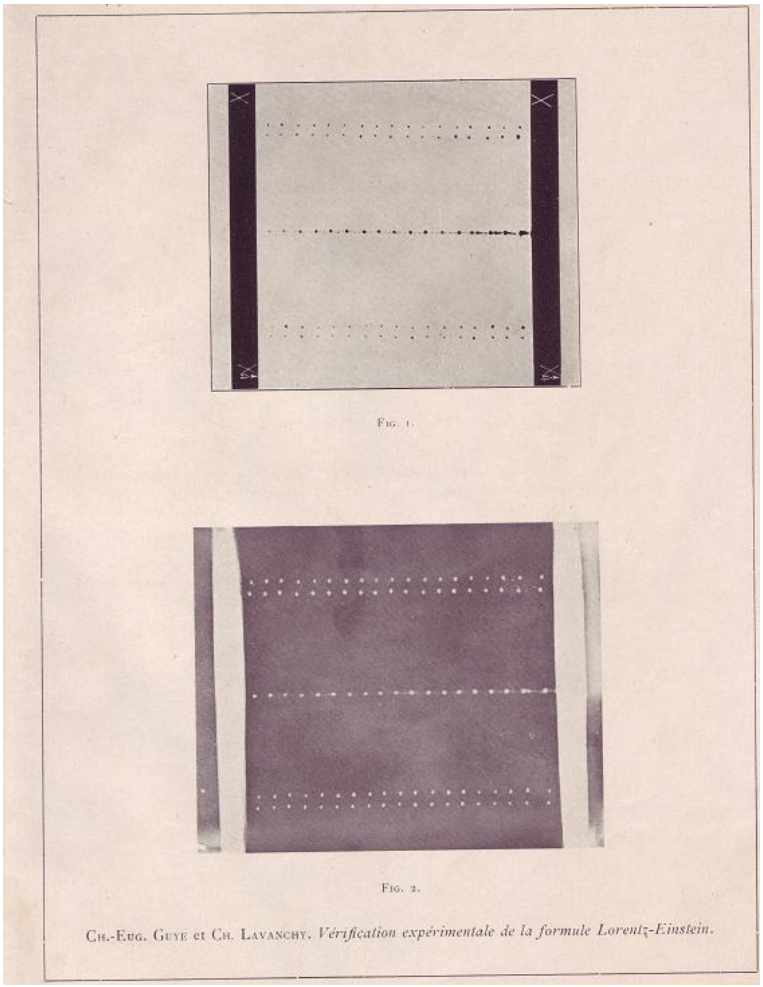

Fig. 1.

Fig. 2.

Ch.-Eug. Guye et Ch. Lavanchy. *Vérification expérimentale de la formule Lorentz-Einstein.*

FIGURE 3.4 – Deux clichés proposés par Guye. Celui du haut est l'image d'une plaque photographique. C'est le même que celui présenté en 1915. Celui du bas propose l'image du phénomène tel qu'observé par Guye et Lavanchy. C'est un cliché inédit en 1921. (GUYE, 1921, Planche 5)

3.1.4 Guye et la relativité

Guye manifeste son intérêt pour les théories de la matière tout au long de sa carrière. En 1904, il propose ainsi deux conférences sur les théories électriques de la matière dans lesquelles il montre sa connaissance de la théorie de l'électron indéformable d'Abraham. Il continue de travailler ce sujet pour publier en 1906 une remarque sur la mesure de la charge spécifique de l'électron. À cette occasion, et bien qu'il connaisse la théorie de Lorentz, il ne considère que la théorie d'Abraham. L'année d'après, stimulé par les critiques formulées à l'encontre des expériences de Kaufmann, il se lance dans une mesure de la variation de l'inertie des électrons en fonction de la vitesse. L'objectif est alors de choisir entre deux modèles d'électron. Cette expérience aboutit, 14 ans plus tard et selon Guye, à la vérification (indirecte) de la relation d'équivalence entre la masse et l'énergie $mV^2 = E$, conséquence des plus importantes du "nouveau principe".

Que s'est-il passé entre 1907 et 1921 pour qu'une expérience débutée dans un contexte aboutisse à une conclusion formulée dans un contexte différent ? De façon évidente, la théorie de la relativité a acquis un statut fondamental et une autonomie vis à vis de la théorie de Lorentz qu'elle n'avait pas encore en 1907. Mais, du point de vue particulier de Guye, comment s'effectue ce changement ? À quand remonte-t-il ?

En fait, il est impossible de répondre à ces questions sans interroger la relation que Guye entretient avec Einstein depuis au moins 1909. Cette année là, le 4 mai 1909, Guye propose Einstein au titre de docteur *honoris causa* de l'Université de Genève qui sera remis en juillet, lors du 350^{me} anniversaire de la fondation de l'Académie par Calvin. C'est le premier signe documenté de l'intérêt que Guye porte au travail d'Einstein.

> "D'autre part, sur la proposition de M. Eug Guye, la Faculté ajoute le nom de M. Einstein, physicien, Berne." [79]

Einstein répond le 1^{er} juin à l'invitation de Guye, qu'il affirme accepter avec joie. Il dit également se souvenir "des moments passés ensemble à Zürich, où [ils] ont discuté de tant de choses intéressantes" [80]. Nous ne savons pas de quand date cette rencontre à Zürich. Si elle est récente, Guye lui a certainement parlé de l'expérience

79. Voir Procès Verbaux des séances du Conseil de la faculté des sciences, Dépôt des bibliothèques universitaires, Genève. Volume 1984/22/81.

80. "Nur das eine darf ich wohl sagen, dass ich mich mit viel Vergnügen unseres Beisammenseins in Zürich erinnere, wo wir über manches Interessante zusammen sprachen", lettre conservée à la bibliothèque du musée d'histoire des sciences de Genève, sous la côte Z281/1 n^{o}1. Voir Annexe B pour la lettre complète .

en cours et Einstein a dû manifester de l'intérêt, comme dans le cas de l'expérience de Hupka[81], de Bucherer[82] ou de Kaufmann[83]. Quoi qu'il en soit, Einstein est à Genève du 7 au 9 juillet[84]. Il écrit le 9 juillet être "charmé de l'amitié et de la gentillesse "[85] qui lui sont manifestées.

Il rencontre nécessairement Guye à cette occasion, qui vient d'annoncer publiquement son travail[86]. Quelques mois plus tard, le 20 janvier 1910, Einstein écrit de Zürich à Guye :

> "Très estimé collègue,
>
> Avez-vous abandonné votre idée de venir à Zürich ? Vous me feriez un grand plaisir si vous me laissiez prendre part au difficile travail que vous avez entrepris, ne serait-ce que pour apporter la confirmation d'un quelconque détail. Je ne vous ai pas écrit depuis longtemps seulement car j'attendais une lettre de votre part. Je vous prie donc de ne pas prendre mon silence pour un manque d'intérêt. J'ai toujours le plus grand plaisir si je peux prendre une quelconque part à la réussite d'une entreprise scientifique.
>
> Avec toute mon attention, votre tout dévoué,
>
> A. Einstein"[87]

Non seulement il a connaissance des recherches de Guye et Ratnowsky, mais il propose de plus de "prendre part à ce travail". Il est alors trop tard pour cela, Guye ayant fait publier les résultats définitifs des expériences deux semaines plus tôt.

Entre leur rencontre à Genève en juillet 1909 et la rédaction de la note contenant les résultats expérimentaux à la fin de cette même année[88], Guye intègre au titre de

81. Le 16 mai 1909 (Einstein, 1993, Lettre 159), Jakob Laub informe Einstein de la confirmation de la théorie de la relativité à Berlin. Trois jours plus tard, Einstein lui répond en avoir été informé par Planck (Einstein, 1993, Lettre 161).

82. Einstein et Bucherer entretiennent une correspondance initiée par le second qui l'informe avoir "prouvé la validité du principe de relativité" le 7 septembre 1908 (Einstein, 1993, Lettres 117, 119, 120).

83. Voir Partie 1.6.2.1.

84. Le programme des festivités se trouve aux Archives du DIP, carton 5.3.20 Université 1. Un compte rendu journalier en est fait par le *Journal de Genève*. Enfin, Mehra (1975, p. xx-xxi) fait référence à cet épisode comme l'un des premiers rassemblements "d'importance" auquel Einstein assiste, avec, par exemple, la présence de Marie Curie ou Wilhelm Ostwald.

85. Lettre écrite de Genève à Lucien et Jeanne Chavan-Perrin, le 9 juillet 1909 (Einstein, 1993, Lettre 170).

86. Le 1^{er} juillet.

87. Lettre conservée à la bibliothèque du Musée d'histoire des sciences de Genève, sous la côte Z281/1 n^{o}2. Voir Annexe B.

88. Guye et Einstein se rencontreront à nouveau le 7 mai 1910, lors de la séance annuelle de la Société suisse de physique à Neuchâtel. Voir les comptes rendus dans les *Archives des sciences physiques et naturelles*, **29** p. 520 (1910). Einstein mentionne également ce déplacement dans une lettre à Chavan le 6 mai (Einstein, 1993, Lettre 205).

sa communication une référence au principe de relativité. Bien que dans le corps du texte, cette référence soit des plus succinctes, peut-on voir là une marque des discussions que Guye et Einstein ont eues en juillet, ou doit-on se contenter de dire qu'il ne fait que s'inspirer du titre des articles de Bucherer en 1909 [89] ? De même, comment interpréter la timidité avec laquelle, en 1910, Guye mentionne en titre le principe de relativité puis l'abandonne en 1911 ? Est-ce la prudence de l'expérimentateur qui n'a pas encore montré la validité de ladite théorie et qui, malgré l'intérêt qu'il porte à Einstein, ne s'aventure pas à affirmer la validité du principe de relativité ?

Les écrits auxquels donne lieu l'expérience de Guye et Lavanchy ne voient pas Guye affirmer la validité de ce principe. S'il ne considère plus le problème de la variation de l'inertie avec la vitesse comme uniquement issu de considérations électromagnétiques, il ne met pas non plus l'accent sur la relativité.

Pendant la reprise de l'expérience, entre 1913 et 1915, Guye et Einstein continuent de correspondre. Le 31 mai 1913, Guye l'invite à participer à l'inauguration du buste de Pierre Prévost [90]. Le courrier de Guye contient des pièces jointes, dont la nature nous est inconnue. Einstein ne peut venir à Genève [91]. Deux ans plus tard, le 11 octobre 1915, Einstein écrit à Guye et lui demande de l'excuser de son absence à la session annuelle de la Société des sciences physique qui s'était tenue à Genève le 14 septembre [92]. Guye lui répond certainement en lien avec les sentiments exprimés par Einstein sur la guerre dans la précédente lettre. Le 4 novembre, Einstein le remercie pour son "aimable lettre" [93].

L'année suivante, le 1^{er} novembre 1916, Einstein envoie à Guye les "documents qu'[il lui a] demandés" [94]. Nous ne savons pas avec précision de quels documents il s'agit, seulement qu'ils concernent la théorie de la relativité.

> "J'attends encore quelques jours pour pouvoir vous envoyer ma dernière notice sur le sujet, actuellement en cours d'impression. C'est dans cette notice et dans la brochure [sur la théorie générale de la relativité] mentionnée plus haut que la théorie sera le mieux exposée." [95]

89. *Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips.*
90. Einstein (1993, Lettre 443).
91. Einstein (1993, Lettre 444).
92. Lettre conservée à la Bibliothèque du musée d'histoire des sciences de Genève, sous la côte Z281/1 n°3. Voir *Archives*, **40** p. 329 (1915).
93. Lettre conservée à la bibliothèque du musée d'histoire des sciences de Genève, sous la côte Z281/1 n°4. Voir Annexe B.
94. Lettre conservée à la bibliothèque du musée d'histoire des sciences de Genève, sous la côte Z281/1 n°5. Voir Annexe B.
95. *ibid* : "Am besten ist die Theorie in der Broschüre dargelegt und in der kurzen Notiz, die

Plus loin, Einstein confirme son intérêt pour les expériences de Guye et Lavanchy.

> "Je m'intéresse beaucoup à votre poursuite des travaux que vous aviez entrepris avec Ratnowsky il y a quelques temps sur la vérification de la théorie de la relativité restreinte. D'après une courte notice [96] parue dans les Archives à ce sujet, il s'agit de l'un des meilleurs travaux dans le domaine." [97]

Il faut attendre ensuite un peu plus de trois années pour retrouver trace de la correspondance Einstein-Guye, en janvier 1920. À ce moment là, Guye n'envisage plus son travail expérimental sur la variation d'inertie dans le cadre de la théorie de l'électron. Lors de la séance du 5 décembre 1918 de la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève, il propose en effet les tables donnant les valeurs des masses cinétique, transversale et longitudinale en fonction de la vitesse et conclut que ces "résultats connus, n'en seront pas moins utiles aux physiciens qui peuvent avoir à se rendre compte de l'importance de ces diverses variations dans *l'étude du principe de relativité*" [98].

La lettre précédente et ce dernier travail de Guye montrent que s'il s'intéresse au travail d'Einstein dès 1909 et si ces recherches expérimentales tendent dès 1910 à lui faire croire à la validité de la formule de Lorentz-Einstein, pour l'affirmer fermement dès septembre 1915, il faut attendre la fin de l'expérience avec Lavanchy pour le voir interpréter celle-ci dans le cadre relativiste et non plus électromagnétique. Il s'intéresse alors clairement à la théorie d'Einstein et va se proposer de la diffuser à son public genevois. Ainsi, le 20 décembre 1917 paraît dans les *Archives* une conférence de Guye sur un *Exposé de quelques conséquences du principe de relativité* [99]. Il parle alors de l'espace et du temps tels qu'envisagés dans la théorie d'Einstein, en rappelle les relations de contraction et dilatation, explique que le concept d'éther est inutile dans la relativité et indique quelques conséquences de cette nouvelle conception : l'expérience de Michelson et Morley est expliquée, la variation de l'inertie avec la vitesse, l'équivalence masse énergie et la gravitation [100].

Guye a mis à profit les articles que lui a envoyés Einstein un an auparavant.

---

gerade gedruckt wird".

96. Cette notice doit être la communication de ses résultats par Guye en septembre 1915.
97. *ibid.* :"Sehr interessiere ich mich für Ihre Fortsetzung das seinerzeit mit Ratnowski [sic] begonnenen Unternehmens zur Prüfung der speziellen Relativitätstheorie. Nach einer kurzen, im Archive erschienenen Notiz über den Gegenstand ist dies eine der wertvollsten Arbeiten auf dem Gebiet."
98. Guye (1918, p. 82 ; nous soulignons).
99. Guye (1917a).
100. Il serait intéressant de retrouver et d'étudier les conceptions de Guye sur la relativité, afin de compléter l'approche que nous développons dans cette thèse.

Le 3 janvier 1920, toujours dans la même optique de diffuser la théorie de la relativité, il lui demande de bien vouloir venir à Genève pour donner des conférences.

> "[L]'Université de Genève qui est particulièrement heureuse de vous compter au nombre de ses Docteurs honoris causa, vous serait profondément reconnaissante, s'il vous était possible en passant en Suisse, de nous accorder le privilège d'une petite conférence exposant par ex : l'idée philosophique du principe de relativité généralisée. Il est bien entendu que si vous préfèreriez [sic] nous exposer vos vues sous une autre forme , par ex par quelques leçons à nos étudiants, vous auriez entière liberté." [101]

Le 12 janvier, Einstein lui répond que cette visite lui ferait très plaisir. Il lui glisse un mot sur son expérience.

> "Votre recherche sur le mouvement des électrons fait à mon avis partie des confirmations les plus importantes de la théorie de la relativité restreinte. Je ne me rappelle plus vous avoir fait part de ma joie sur la réussite de cette belle recherche." [102]

Le 21 janvier, Guye fait part à Einstein du "vif plaisir" qu'il a eu de voir sa demande accueillie favorablement. Il insiste à nouveau sur la possibilité qu'aurait Einstein de donner des conférences grand public d'une part et plus spécialisé de l'autre. La remarque d'Einstein sur l'expérience de Guye et Lavanchy ne le laisse bien sûr pas indifférent.

> "J'ai été très sensible à votre appréciation sur les travaux de notre Laboratoire concernant le mouvement des électrons et votre avis, joint à celui de Larmor qui m'avait écrit un mot dans le même sens m'a causé une vive satisfaction." [103]

Einstein ne viendra pas donner ces conférence à Genève, malgré sa promesse réitérée en avril 1920 [104]. Les relations entre les deux physiciens se poursuivent cependant et, deux ans plus tard, Einstein s'excuse encore de ne pas être venu à Genève, après avoir exprimé à Guye ses condoléances suite à la mort de son frère. C'est dans cette lettre du 18 avril 1922 qu'Einstein affirme que ses résultats sur la variation d'inertie

101. Einstein (2004, Lettre 243).
102. (Einstein, 2004, Lettre 255) : "Ihre Untersuchung über die Elektronenbewegung gehört nach meiner Ansicht zu den wichtigsten Bestätigung der speziellen Relativitätstheorie. Ich erinnere mich nicht, ob ich Ihnen damals meine Freude über das Gelingen dieser feinen Untersuchung ausgedrückt habe."
103. Einstein (2004, Lettre 273).
104. Lettre conservée à la bibliothèque du musée d'histoire des sciences de Genève, sous la côte Z281/1 n°8.

des électrons font l'unanimité à Berlin. Il s'agit à notre connaissance de la dernière lettre retrouvée de la correspondance Einstein-Guye.

3.2 La méthode des trajectoires identiques

3.2.1 Principe général des expériences

Le principe général des expériences que Guye réalise avec Ratnowsky puis Lavanchy est relativement simple à comprendre. Nous ne rentrons pas ici dans les détails des matériaux utilisés, des dimensions précises et des subtilités techniques. Ces points seront repris en détail [105] dans la partie 4.

Dans un tube cathodique, des électrons sont émis et accélérés entre deux électrodes. La cathode, maintenue à un potentiel négatif $-U$, est un disque métallique. L'anode, reliée à la terre, constitue l'électrode positive. Elle est cylindrique. À l'intérieur se trouve un diaphragme dont l'ouverture est de quelques dizièmes de millimètres. La distance entre les électrodes est d'environ 30 cm. À la sortie du diaphragme, les électrons ne sont plus soumis à l'accélération, la surface extérieure du tube étant recouverte de papier d'étain relié comme l'anode à la terre. Dans cette partie du tube, ils traversent un condensateur dont les armatures sont reliées à des potentiels opposés de valeur absolue $\frac{V}{2}$. Autour du tube, deux bobines parcourues par un courant d'intensité I créent un champ magnétique perpendiculaire au champ électrique créé par le condensateur. Les électrons sont donc déviés dans la même direction par le champ électrique et par le champ magnétique. Ils viennent finalement heurter le fond du tube — l'écran — et leur impact crée un spot, une "tache fluorescente" [106]. La figure 3.5 montre le schéma du tube cathodique de Guye et Lavanchy. Celui de Guye et Ratnowsky est similaire.

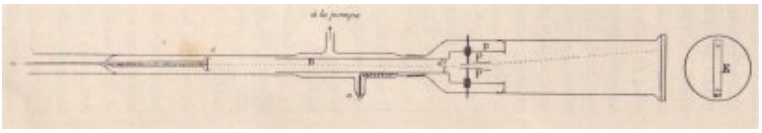

FIGURE 3.5 – Schema du tube cathodique. GUYE et LAVANCHY (1916)

En résumé, lorsque le $V = 0\ V$ et $I = 0\ A$, le spot se trouve au centre de l'écran [107]. Lorsque le condensateur est alimenté, le champ électrique a pour effet de

105. On trouvera également un rappel de la méthode expérimentale dans lequel nous mettons en valeur les points plus expérimentaux. Ainsi, le lecteur ne souhaitant pas approfondir la démonstration de la méthode mais simplement en savoir l'essentiel peut se référer plutôt à la partie 4.3.5.1.

106. GUYE et RATNOWSKY (1911, p. 307).

107. Guye précise que le tube est placé au centre d'un dispositif de cadres parcourus par un courant afin de compenser le champ magnétique terrestre et ainsi d'en annuler l'effet qui est ici indésirable.

dévier le faisceau. Le spot n'est plus au centre. Selon la polarité des armatures, la déviation se fait dans un sens ou dans l'autre. De même, lorsque les bobines sont parcourues par le courant électrique, le faisceau est dévié. Les déviations sont successives, c'est-à-dire que le faisceau est dévié soit électriquement soit magnétiquement. La figure 3.6 montre le schéma du dispositif et en particulier le jeu d'interrupteurs et de commutateurs permettant de choisir le type de déviation et son sens.

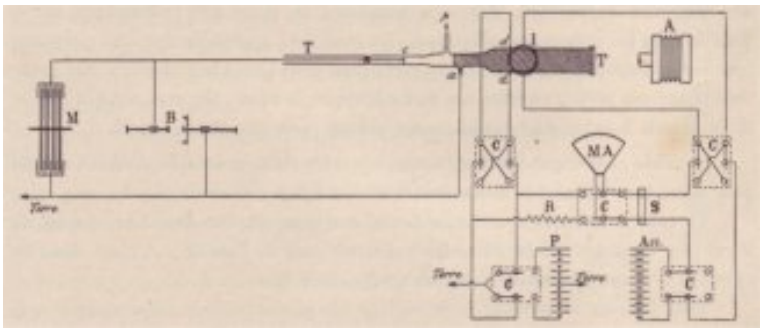

FIGURE 3.6 – Schéma général du dispositif expérimental. GUYE et LAVANCHY (1916)

L'idée fondamentale de ces expériences est d'ajuster les champs électriques et magnétiques de façon à travailler à déviation constante — Guye et Ratnowsky — ou quasi-constante — Guye et Lavanchy — puis de comparer les potentiels et intensités réglés dans ce but. À chaque nouvelle valeur du potentiel d'accélération U correspondent ainsi deux valeurs V et I qui permettent d'obtenir des déviations (quasi-) constantes. C'est ce que Guye et Ratnowsky nomment en 1910 la *méthode de trajectoires identiques* [108], qui deviendra *méthode des trajectoires identiques* l'année après [109].

3.2.2 La méthode des trajectoires identiques selon Guye et Ratnowsky

Guye et Ratnowsky mentionnent que Jean Malassez a utilisé avant eux une méthode de "déviation constante" [110]. En 1905 en effet, alors que sont discutées les différences entre les valeurs de la charge spécifique des rayons cathodiques obtenues par différents chercheurs, celui-ci soumet l'hypothèse alors proposée par J. J. Thomson selon laquelle les rayons ne sont peut-être pas accélérés sous la différence de

108. GUYE et RATNOWSKY (1910a, p. 327).
109. GUYE et RATNOWSKY (1911, p. 295).
110. MALASSEZ (1905).

potentiel entre la cathode et l'anode. Nous revenons sur ces débats et la méthode suivie par Malassez dans la Partie 5.3.3. Notons ici seulement que cette méthode est avancée comme moyen d'obtenir une meilleure précision.

> "Au point de vue de l'exactitude des mesures, il était préférable de s'arranger, en diminuant l'intensité du champ magnétique [111], de telle sorte que le rayon de courbure restât le même." [112]

Guye et Ratnowsky ne le mentionnent pas, mais Hupka utilise également une méthode de déviation constante, qu'il qualifie de "relative" [113]. Mais comme Malassez, le jeune Allemand ne procède pas à une analyse de la méthode en tant que telle. Guye et Ratnowsky ne font pas non plus référence à Bestelmeyer qui mesurait en 1907 la charge spécifique de l'électron par une méthode de trajectoires identiques [114]. L'expérimentateur allemand énonçait alors clairement que cette méthode permettait de ne pas faire intervenir les dimensions du dispositif dans l'analyse des mesures. En revanche, Guye et Ratnowsky sont les seuls à mettre en avant, et à étudier explicitement, l'élimination des incertitudes liées aux inhomogénéités des champs électrique et magnétique.

> "Nous avons utilisé pour la détermination du rapport $\frac{\mu'}{\mu}$ [115] la méthode consistant à observer la déviation d'un faisceau cathodique sous l'action successive et alternée d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Cette méthode est susceptible de donner des résultats très comparables, si l'on a soin d'opérer à *déviation constante* et à champ magnétique ou électrique variables. Dans ces conditions, on élimine en effet presque complètement du rapport $\frac{\mu'}{\mu}$ l'incertitude qui existe toujours sur la forme exacte et la valeur des champs électrique et magnétique que traverse le corpuscule." [116]

Voici comment Guye et Ratnowsky expliquent et justifient cette méthode.

111. Dans le dispositif de Malassez, les électrons sont accélérés sous une différence de potentiel V puis freinés sous une différence de potentiel V'. Ils sont ensuite déviés par un champ magnétique H. Selon la valeur de V', le champ magnétique doit être ajusté de telle sorte qu'ils suivent toujours la même trajectoire. Il compare ensuite la valeur de V déduite de la mesure des champs magnétiques à celle mesurée entre la cathode et l'anode.
112. Malassez (1905, p. 885).
113. "Die angewandte Meßmethode war eine relative" (Hupka, 1910a, p. 186).
114. Voir paragraphe 1.6.2.1.
115. Comme souligné plus haut, la "méthode des trajectoires identiques" est une méthode de comparaison, "relative" comme dit Hupka. Il s'agit de comparer des électrons de vitesse v à des électrons de vitesse v'. Cette comparaison aboutit à la valeur du rapport des masses pour ces différentes vitesses.
116. Guye et Ratnowsky (1911, p. 295 ; italiques originales).

3.2.3 Trajectoires identiques dans un champ magnétique (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 296-297)

Pour un point quelconque de la trajectoire des électrons de masse $\mu(v)$ se déplaçant à la vitesse v, la déviation magnétique dans un champ magnétique H est donnée par l'équation

$$\frac{\mu v^2}{\rho} = Hv\epsilon \sin\alpha, \tag{3.2}$$

où ρ est le rayon de courbure de la trajectoire et α l'angle entre la vitesse et le champ.

Exprimée pour des électrons se déplaçant à la vitesse v', de masse $\mu'(v)$, elle devient

$$\frac{\mu' v'^2}{\rho'} = H'v'\epsilon \sin\alpha, \tag{3.3}$$

Ici, ils auraient dû écrire α', car même s'ils supposent que les champs ont la même direction et que les électrons "arrivent au même point, dans la même direction" [117], ils ne précisent pas encore que les électrons *partent* selon la même direction.

Ils affirment ensuite que "[p]our que deux trajectoires se maintiennent identiques il faut que l'on ait $\rho = \rho'$" [118], en tout point de la trajectoire. Ajoutons qu'il y a équivalence dès lors qu'un point est commun aux deux trajectoires, la position du spot ramenée toujours à la même valeur. Cela justifie également l'égalité $\alpha = \alpha'$.

Ces conditions étant réunies, les relations 3.2 et 3.3 donnent

$$\frac{\mu' v'}{\mu v} = \frac{H'}{H}. \tag{3.4}$$

Enfin, comme les champs magnétiques sont produits par des bobines sans noyau de fer, ils sont proportionnels, en chaque point, à l'intensité du courant qui parcourt ces bobines. Il vient dès lors, en chaque point de la trajectoire, la relation suivante :

117. Guye et Ratnowsky (1911, p. 296).
118. Guye et Ratnowsky (1911, p. 296).

$$\frac{\mu' v'}{\mu v} = \frac{I'}{I}. \tag{3.5}$$

Or, la force magnétique ne travaillant pas, le produit μv est constant le long de la trajectoire, une fois que les électrons se déplacent à vitesse constante. Guye et Ratnowsky se sont assurés que dans la zone où ils sont encore accélérés, le champ magnétique est "sensiblement nul"[119]. Donc la relation 3.5 est valide sur toute la trajectoire.

3.2.4 Trajectoires identiques dans un champ électrique (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 297-298)

Le raisonnement est presque identique pour la trajectoire dans un champ électrique. Il faut d'abord tenir compte de l'accélération produite par la composante du champ électrique tangente à la trajectoire et donc des variations de vitesse qui en découlent. Guye et Ratnowsky affirment que "dans les limites de [leurs] expériences, ces variations de vitesse n'étaient que de quelques pour mille"[120], et qu'un "calcul approximatif [leur] a montré que les variations qui en résultent sur la trajectoire sont plus petites que celles qui correspondent à la précision de la mesure des champs électriques"[121]. Ils ne donnent pas le détail de ce calcul.

Une manière assez directe de procéder est de partir de la projection cartésienne de la seconde loi de Newton. Pour ce calcul approximatif, nous procédons dans le cadre de la dynamique classique. Étant données les dimensions du dispositif, le cosinus hyperbolique que l'on obtient en mécanique relativiste se confond avec la parabole classique. De plus, pour les vitesses envisagées, les masses longitudinale et transversale ne diffèrent que d'un facteur 1,33. Deux fois intégrée par rapport au temps, la seconde loi de Newton donne $x = v_0 t$ et

$$y = \frac{\epsilon}{2\mu} E \frac{x^2}{v_0^2}. \tag{3.6}$$

Pour mener le calcul, nous avons considéré un électron se déplacant à une vitesse

119. Guye et Ratnowsky (1911, p. 297 ; note 1).
120. Guye et Ratnowsky (1911, p. 297).
121. Guye et Ratnowsky (1911, p. 297).

$v = 0,3c$ traversant un condensateur de longueur $x_0 = 5\ cm$, la distance entre les amratures étant 88,9 mm, et la différence de potentiel de 300 V. Ce sont des valeurs typiques de celles avec lesquelles travaillent Guye et Ratnowsky [122]. En sortie de condensateur, l'électron n'est dévié que d'environ $Y = 0,75\ mm$, ce qui limite les effets de bord. Quant à la variation de vitesse, elle s'estime par le rapport $\frac{\frac{dy}{dt}}{v_0}$, qui est de l'ordre de 3.10^{-3} d'où la variation de vitesse $\frac{v}{v_0} \approx 1 + 3.10^{-3}$. Cette prise en compte de la variation de vitesse revient à cesser de considérer que la trajectoire est un cercle de rayon de courbure $R = \frac{\mu v_0^2}{eE}$ mais une parabole d'équation la relation 3.6. À la sortie du condensateur, le cercle est au dessus de la parabole et l'écart vaut $d = \frac{1}{8}\frac{x_0^4}{R^3}$. L'erreur relative ainsi faite en considérant que la vitesse est constante est $\frac{d}{Y} = \frac{x_0^2}{4R^2}$, soit 0,0002. Or, d'après la relation 3.6, $\frac{dy}{y} = \frac{dE}{E}$. Il faudrait pouvoir mesurer le champ électrique avec une sensiblité de 0,02 % pour que l'approximation ait des effets mesurables.

> "Il faudrait que les champs électriques fussent mesurés avec une précision de l'ordre des dix-millièmes." [123]

Sous ces approximations, la relation 3.4 pour la déviation dans un champ magnétique devient, pour la déviation dans un champ électrique noté F,

$$\frac{\mu v^2}{\mu' v'^2} = \frac{F}{F'}. \tag{3.7}$$

Guye et Ratnowsky s'arrètent à ce stade et ne relient pas le champ F au potentiel V.

3.2.5 Principe de la méthode (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 298-299).

Le raisonnement précédent permet de justifier la possibilité de faire suivre des trajectoires identiques aux électrons dans des champs électrique et magnétique, moyennant l'approximation d'un champ électrique qui modifie suffisamment peu la vitesse des particules.

122. Nous n'avons pas calculé les valeurs de tension utilisées par Guye et Ratnowsky mais données en graduation de l'appareil de mesure. Nous avons choisi cette valeur par l'expérience que nous avons acquise au cours de la réplication de l'expérience de Guye et Lavanchy pour laquelle les dimensions sont sensiblement équivalentes.

123. Guye et Ratnowsky (1911, p. 297 ; note 2).

> "La condition d'identité des trajectoires étant pratiquement réalisée, représentons les déviations électriques et magnétiques mesurées successivement sur des corpuscules de petite et de grande vitesse." [124]

Guye et Ratnowsky donnent ensuite les relations qui expriment la déviation y, toujours la même, mesurée sur l'écran en fonction de la charge ϵ de l'électron, de sa vitesse v, de sa masse (transversale) μ, du potentiel V et de l'intensité I. Les grandeurs notées $'$ correspondent aux électrons rapides.

Pour la déviation électrique, on a

$$y = [A]\,\frac{\epsilon V}{\mu v^2} \tag{3.8}$$

$$y = [A]\,\frac{\epsilon V'}{\mu' v'^2}. \tag{3.9}$$

Pour la déviation magnétique, on a

$$y = [B]\,\frac{\epsilon I}{\mu v} \tag{3.10}$$

$$y = [B]\,\frac{\epsilon I'}{\mu' v'}. \tag{3.11}$$

Les grandeurs entre crochets $[A]$ et $[B]$ sont respectivement les "intégrales de champ" électrique et magnétique. Elles rendent compte de l'action du champ sur l'électron en chaque point de sa trajectoire et apparaissent dans les équations après le raisonnement suivant [125].

Nous effectuons le calcul dans le cas de la déviation électrique.

La seconde loi de Newton projetée sur l'axe du tube $\vec{u}_x$ et sur $\vec{u}_y$ donne

124. Guye et Ratnowsky (1911, p. 298).

125. En 1897, Kaufmann met au point une méthode qui lui permet de tenir compte de l'inhomogénéité du champ magnétique dans ses mesures de la charge spécifique des électrons (Miller, 1981, p. 100). Il réalise une cartographie expérimentale du champ, qu'il analyse de façon à obtenir ce champ comme fonction des coordonnées. Cette fonction lui permet ensuite de calculer l'intégrale de champ. Nous voyons comment s'exprime cette intégrale peu après. Notons que, en 1899, Simon, élève de Kaufmann, tient compte des inhomogénéités en tentant, déjà, de les limiter par l'emploi d'un électroaimant de construction particulière, et en réalisant un magnétomètre très précis pour mieux calculer ensuite l'intégrale de champ. En 1906, Kaufmann reprend ce principe. C'est alors qu'il emploie les expressions "magnetische Feldintegral" et "elektrische Feldintegral" (Kaufmann, 1906, p. 55).

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} &= 0 \\ \frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} &= \frac{\epsilon}{\mu}F. \end{aligned} \tag{3.12}$$

L'origine du repère étant posée au niveau du diaphragme centré sur l'axe du tube, la première conduit à $x = vt$. Ensuite,

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} &= \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \\ \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} &= \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}v \\ \frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} &= \left(\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}x^2}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right)v \\ \frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} &= \frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}x^2}v^2. \end{aligned} \tag{3.13}$$

La combinaison des relations 3.12 et 3.13 conduit à la relation

$$\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}x^2} = \frac{\epsilon}{\mu v^2}F. \tag{3.14}$$

Le facteur $\frac{\epsilon}{\mu v^2}$ est une constante sur la trajectoire, alors que le champ F ne l'est pas, ne serait-ce que parce qu'une partie de la trajectoire se fait en dehors du condensateur. Intégrée, la relation 3.14 devient [126]

$$y(x_0) = \frac{\epsilon}{\mu v^2}\int_0^{x_0}\mathrm{d}x\int_0^{x}F(\tilde{x})\,\mathrm{d}\tilde{x}. \tag{3.15}$$

La comparaison des relations 3.8 et 3.15 montre que Guye et Ratnowsky considèrent que

$$\int_0^{x_0}\mathrm{d}x\int_0^{x}F(\tilde{x})\,\mathrm{d}\tilde{x} = [A]V. \tag{3.16}$$

126. x_0 correspond à la position de l'écran dans le repère choisi.

Ils ne justifient pas mais affirment

> "[A] est l'intégrale de champ électrique ; soit en première approximation $\int_0^{x_0} \mathrm{d}x \int_0^x F_1 \,\mathrm{d}x$ mesurée le long de la trajectoire pour une différence de potentiel $V = 1$ entre les plateaux du condensateur qui crée ce champ [...]" [127]

À ce stade, nous ne comprenons la "première approximation" dont parlent Guye et Ratnowsky que de la manière suivante. En effet, si l'on exclut les effets de bord, "suffisamment loin" des plateaux, et l'ionisation de l'air résiduel [128], le champ électrique défini comme $F(\vec{r}) = -\vec{\nabla}V(\vec{r})$ est en chaque point $\vec{r}$ proportionnel à la tension entre les deux plateaux symétriques. D'où $F = \alpha(\vec{r})V$. Ceci est corroboré par Guye et Lavanchy en 1916 [129]. Et alors, la relation 3.16 peut s'écrire

$$\int_0^{x_0} \mathrm{d}x \int_0^x F(\tilde{x})\,\mathrm{d}\tilde{x} = \int_0^{x_0} \mathrm{d}x \int_0^x \alpha(\tilde{x})V\,\mathrm{d}\tilde{x} \tag{3.17}$$

$$[A] = \int_0^{x_0} \mathrm{d}x \int_0^x \alpha(\tilde{x})\,\mathrm{d}\tilde{x}. \tag{3.18}$$

Ils procèdent ensuite de même pour le champ magnétique proportionnel à l'intensité I du courant qui parcourt les bobines. Ils justifient, rappelons le, cette affirmation par l'emploi de bobines sans noyau de fer. Mais il disent également

> ""[B] est l'intégrale de champ magnétique ; soit approximativement $\int_0^{x_0} \mathrm{d}x \int_0^x H_1 \,\mathrm{d}x$ pour l'intensité de courant $I = 1$ traversant les bobines qui produisent le champ magnétique." [130]

Sur quoi porte l'approximation ? Ils ne le précisent pas. Ils pensent peut-être aux parties métalliques à l'intérieur du tube qui pourraient modifier le champ magnétique. Guye et Ratnowsky utilisent de l'aluminium [131].

Des relations 3.8 à 3.11, ils déduisent enfin les relations 3.20 et 3.19. Nous détaillons le calcul.

127. Guye et Ratnowsky (1911, p. 298).
128. Rappelons que c'est ce problème d'ionisation qui avait valu à Kaufmann les critiques les plus vives. Il ne se produit *a priori* pas dans le dispositif de Guye et Ratnowsky.
129. Ils disent en effet :"[...] en admettant que le champ est bien, en chaque point, proportionnel à la tension des plateaux". Puis une note précise cette idée : "Donc en ne tenant pas compte de l'altération du champ par les phénomènes d'ionisation qui, au degré de vide de nos expériences sont très vraisemblablement sans influence" (Guye et Lavanchy, 1916, p. 293 et p. 293, note 3).
130. Guye et Ratnowsky (1911, p. 298).
131. Guye et Lavanchy utilisent eux du laiton.

En divisant 3.8 par 3.10, puis 3.9 par 3.11 on obtient

$$v = \frac{[A]V}{[B]I}$$
$$v' = \frac{[A]V'}{[B]I'},$$

d'où l'on tire

$$\frac{v'}{v} = \frac{V'I}{VI'}. \tag{3.19}$$

En divisant ensuite 3.11 par 3.10, on a

$$\frac{\mu'}{\mu} = \frac{I'v}{Iv'},$$

d'où

$$\frac{\mu'}{\mu} = \frac{I'^2V}{I^2V'}. \tag{3.20}$$

> "Le rapport $\frac{\mu'}{\mu}$ se déduit dont des valeurs relatives de deux intensités et de deux différences de potentiel mesurées avec le même instrument." [132]

3.2.6 Détermination de la vitesse absolue des corpuscules (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 299-300)

> "Mais pour comparer les résultats de l'expérience à ceux que donnent les formules théoriques il est nécessaire de connaître la valeur absolue des vitesses v et v'. Pratiquement il suffira dans chaque série d'expériences de connaître une seule de ces vitesses pour que toutes les autres soient déterminées par la formule [3.19]." [133]

Guye et Ratnowsky expliquent après comment ils procèdent pour "comparer" l'expérience et la théorie. Ici, ils cherchent d'abord à déterminer une vitesse v de laquelle ils déduiront v' puisqu'ils connaissent le rapport $\frac{v'}{v}$ de la mesure des champs. Pour trouver cette vitesse v, ils utilisent la relation 3.8

132. Guye et Ratnowsky (1911, p. 298-299).
133. Guye et Ratnowsky (1911, p. 299).

$$y = [A]\,\frac{\epsilon V}{\mu v^2}.$$

Pour cela ils doivent connaître d'une part le rapport $\frac{\epsilon}{\mu}$. "Ce nombre est connu par l'ensemble des recherches antérieures sur les rayons cathodiques ; de plus pour les *rayons cathodiques de faible vitesse il est à peu près indépendant des théories proposées* [134]. Ils choisissent la valeur proposée en 1899 par Simon et que Guye connaît pour s'être intéressé en 1906 à sa détermination. Ils utilisent d'ailleurs la valeur corrigée, soit $1{,}878.10^7$ CGS.

Ils doivent également connaître la valeur de l'intégrale de champ électrique [135], qu'ils déterminent en combinant la relation "bien connue" [136]

$$U\epsilon = \frac{1}{2}(\mu)v^2,$$

et la relation 3.8 [137]. Ils obtiennent alors

$$\begin{aligned}
[A] &= \frac{\mu v^2 y}{\epsilon V} \\
[A] &= \frac{\mu y}{\epsilon V}\frac{2U\epsilon}{(\mu)} \\
[A] &= 2\frac{U}{V}\frac{\mu}{(\mu)}y.
\end{aligned} \tag{3.21}$$

Guye et Ratnowsky mesurent U [138], V et y. Ils déduisent alors une valeur approchée de $[A]$ en considérant que les masses transversale et cinétique sont égales, ce

134. Guye et Ratnowsky (1911, p. 300).
135. Guye et Ratnowsky auraient tout aussi pu bien utiliser la relation 3.10 mais il aurait alors fallu connaître l'intégrale de champ magnétique qui dépend de la charge spécifique de l'électron, alors que l'intégrale de champ électrique ne dépend que de grandeurs mesurables (Eq. 3.21).
136. Guye et Ratnowsky (1911, p. 299). Cette formule est parfois appelée formule de Schuster. C'est en effet lui qui a proposé pour la première fois en 1884 d'utiliser cette relation pour mesurer la charge spécifique associée au rayonnement cathodique. La formule que nous donnons ici tient compte de la variation de l'inertie avec la vitesse.
137. Rappelons que U est le potentiel qui sert à accélérer les électrons et (μ) la masse cinétique.
138. Cette valeur du potentiel de décharge, dont la mesure est à la source de l'une des critiques formulées par Heil envers Hupka et que Guye et Ratnowsky rappellent, est relativement faible, entre 10 et 15 kV. C'est là tout l'intérêt de mesurer $[A]$ pour des rayons "lents".

qui est une approximation car les vitesses ne sont pas rigoureusement nulles. Cette valeur de $[A]$ leur permet de calculer une valeur de la vitesse v par la relation 3.8 écrite comme suit

$$v^2 = \frac{\epsilon}{\mu}\frac{[A]V}{y},$$

avec $\frac{\epsilon}{mu}$ identifié à la charge spécifique pour une vitesse nulle. Ils utilisent alors cette vitesse approchée $\tilde{v}$ pour déterminer la valeur de $\frac{\mu}{(\mu)}$ pour chacune des théories. Ils obtiennent alors la valeur de $[A]$, de laquelle ils déduisent la vitesse v des rayons lents par la relation précédente. Guye et Ratnowsky utilisent alors certainement la valeur de $\frac{\epsilon}{\mu}$ à la vitesse $\tilde{v}$, mais ils ne le précisent pas.

3.2.7 Comparaison avec les formules théoriques (Guye et Ratnowsky, 1911, p. 300-301 et p. 315)

Rappelons les relations qui permettent à Guye et Ratnowsky de comparer leurs mesures aux théories d'Abraham et de "Lorentz".

$$\begin{aligned}
\frac{\mu'}{\mu} &= \frac{I'^2 V}{I^2 V'} \\
\frac{v'}{v} &= \frac{V' I}{V I'} \\
[A] &= 2\frac{U}{V}\frac{\mu}{(\mu)}y \\
v^2 &= \frac{\epsilon}{\mu}\frac{[A]V}{y}.
\end{aligned}$$

La mesure de $[A]$ pour des rayons lents donne, pour *chacune des théories à tester*, une valeur de v, dont on déduit v'. Bien sûr, les mesures qui conduisent à celles-ci sont obtenues pour une même série d'expériences, c'est-à-dire pour des faisceaux de vitesses v' différentes qui ont suivi la même trajectoire dans un dispositif dont la géométrie est restée constante. Guye et Ratnowsky présentent 7 séries de mesures contenant au total 27 valeurs de v'.

Dans *chacune des théories à tester*, et dans chaque série d'expériences, v conduit à une valeur de $\frac{\mu}{\mu_0}$. Ce rapport permet alors par la relation 3.20 d'obtenir $\frac{\mu'}{\mu_0}$.

"Pour la commodité des calculs et la rapidité des comparaisons nous avons établi graphiquement et à une grande échelle les courbes de $\left[\frac{\mu}{\mu_0}\right]$ en fonction de la vitesse et cela dans les deux hypothèses précédentes. Ces courbes sont représentées en réduction aux conclusions de ce mémoire (Fig. [3.7])."[139]

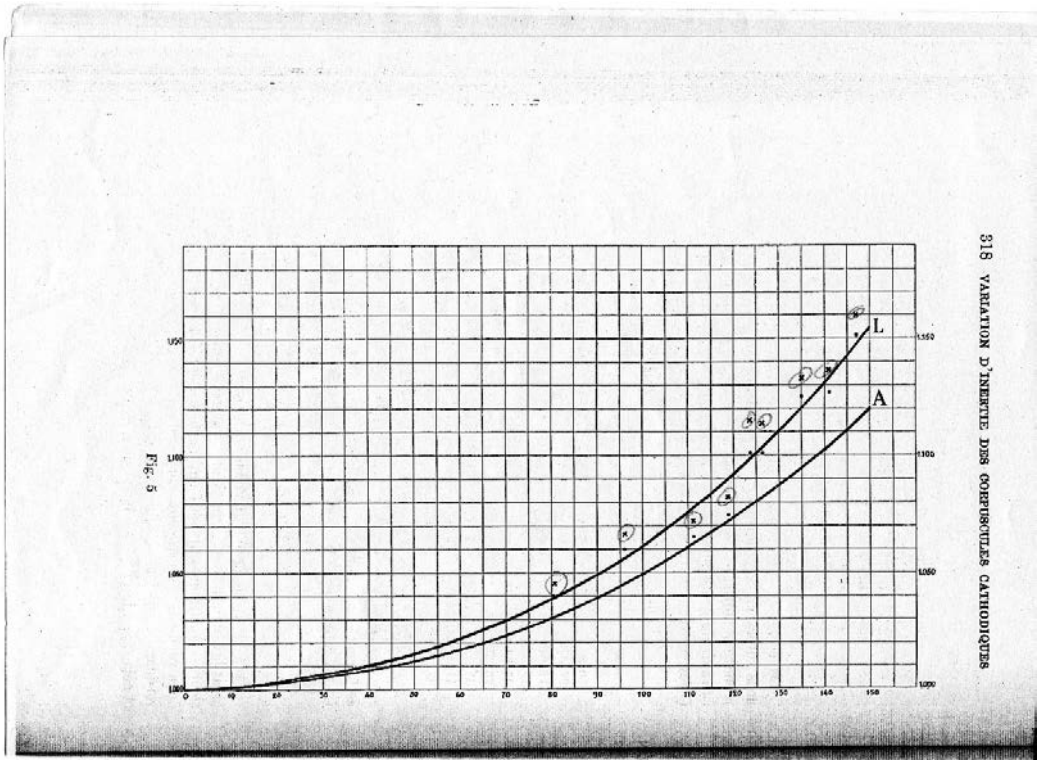

FIGURE 3.7 – Résultats des expériences de Guye et Ratnowsky (GUYE et RATNOWSKY, 1911, p. 318). Sur ce graphique, Guye et Ratnowsky représentent les variation de $\frac{\mu}{\mu_0}$ en fonction de $\beta = \frac{v}{c}$. Nous avons entouré les points issus des mesures et calculés dans l'hypothèse de Lorentz. Les courbes L et A sont les courbes théoriques données par les formules de Lorentz et d'Abraham. Les points issus des mesures sont à comparer avec la théorie qui a servi à les calculer.

139. GUYE et RATNOWSKY (1911, p.301).

3.3 Nouvel examen de la méthode des trajectoires identiques par Guye et Lavanchy : la méthode des trajectoires presque identiques

3.3.1 Modifications apportées au dispositif par Guye et Lavanchy

Dans leur communication de 1914 annonçant la reprise de l'expérience, Guye et Lavanchy affirment avoir employé la "méthode des trajectoires identiques déjà utilisée au Laboratoire de Physique de Genève"[140], en lui apportant des modifications qu'ils estiment être des "perfectionnements"[141].

Tout d'abord, la source de tension délivrant le potentiel de décharge n'est plus une source alternative redressée mais une source de tension constante, une machine électrostatique. Hupka utilisait également une bobine d'induction pour produire la tension accélératrice. Il semble que les machines électrostatiques ne permettaient alors pas d'obtenir des tensions suffisantes avec un débit suffisant pour compenser les pertes par effluve ou par des étincelles parasites. Guye et Lavanchy possèdent une telle machine en 1913. En effet, nous apprenons, dans une lettre du 27 octobre 1913, de Guye au Conseiller d'état W. Rosier, que le laboratoire s'est vu accordé une subvention de 500 francs pour "l'achat d'une pompe (dite moléculaire)". Dans le catalogue des instruments du laboratoire, sous le numéro 2903, nous trouvons également "Pompe moléculaire Gaede avec son moteur électrique". Il est précisé que cette pompe a été achetée en 1914 pour la somme de 1360 francs avec un financement de la Société Académique et du Conseil d'État. Il s'agit bien de la pompe utilisée dans l'expérience avec Lavanchy.

Ensuite, le condensateur n'est plus plan mais est "cintré"[142], de manière à ce que les équipotentielles en son sein soient presque tangentes à la trajectoire des électrons. Cette géométrie limite également les effets de bord. Enfin, ils n'observent plus les déviations directement sur l'écran mais les enregistrent avec un appareil photographique.

L'utilisation de l'appareil photographique est considéré par Guye comme le "perfectionnement" le plus essentiel puisqu'il permet de travailler plus rapidement et donc de s'affranchir en partie de l'instabilité du phénomène. Cependant, cette nouvelle façon de procéder "entraîne un nouvel examen de la méthode des trajectoires

140. Guye et Lavanchy (1915a).
141. Guye et Lavanchy (1915a).
142. Guye et Lavanchy (1916, p. 358).

identiques"[143]. Cette nouvelle analyse n'est effectuée (dans une publication) qu'en 1916. Dans les communications de 1915, Guye et Lavanchy se contentent de rappeler les principales relations démontrées en 1911.

Guye et Ratnowsky ramenaient toujours le spot à une position déterminée ce qui, tout en assurant l'identité des trajectoires, leur prenait du temps.

> "Une série de déterminations qui dans le cas du travail précédent pouvait nécessiter un temps souvent très long se faisait presque instantanément par l'enregistrement photographique [...]"[144]

Avec l'enregistrement photographique, ils ne "ram[ènent] plus le faisceau à une déviation rigoureusement constante, mais *presque constante*". Ainsi, "les trajectoires ne [sont] donnc plus rigoureusement identiques, mais *presque identiques*"[145].

Lorsque les champs électrique et magnétique sont nuls, le faisceau se dirige selon l'axe du tube. Cela donne un spot centré sur l'écran. Une déviation électrique donne un spot décalé verticalement, par exmple vers le haut. La déviation opposée donne un spot décalé vers le bas. Guye et Lavanchy notent x la valeur de la double-déviation, c'est-à-dire la distance entre les deux déviations opposées. De même, deux déviations magnétiques opposées donnent deux autres spots décalés verticalement. La double-déviation magnétique correspondant est notée y. Une *détermination* correspond alors à cinq spots verticaux : les deux déviations électriques opposées, les deux déviations magnétiques opposées et l'impact du faisceau non-dévié. Pour une valeur du potentiel donnée, Guye et Lavanchy photographient cette détermination, puis en décalant la plaque photographique dans la direction horizontale, procède à l'enregistrement d'une seconde détermination effectuée à la même vitesse. Ceci explique le cliché présenté dans la figure 3.4.

3.3.2 Nouvelle analyse

L'analyse de Guye et Lavanchy revient alors à reprendre celle proposée en 1911, en tenant compte du fait que les électrons ne suivent plus "rigoureusement" des trajectoires identiques. Les déviations ne sont plus constantes, de même que les intégrales de champ. Il vient alors pour la déviation électrique

143. Guye et Lavanchy (1916, p. 297).
144. Guye et Lavanchy (1916, p. 297, note 1).
145. Guye et Lavanchy (1916, p. 297).

$$x = [A]\,\frac{\epsilon V}{\mu v^2} \tag{3.22}$$

$$x' = \left[A'\right]\,\frac{\epsilon V'}{\mu' v'^2}. \tag{3.23}$$

Pour la déviation magnétique, on a

$$y = [B]\,\frac{\epsilon I}{\mu v} \tag{3.24}$$

$$y' = \left[B'\right]\,\frac{\epsilon I'}{\mu' v'}. \tag{3.25}$$

> "Le raisonnement que nous avons fait plus haut admettait la constance des intégrales de champ. Il n'est donc plus applicable en toute rigueur dans ce nouveau cas, puisque ces intégrales dépendent des trajectoires elles-mêmes. Nous avons ainsi dû entreprendre une étude expérimentale et préalable de la variation de ces intégrales en fonction de la déviation. Cette étude [...] nous a montré que nous pouvions considérer encore *dans le cas de déviations presque constantes* les quantités A et B comme pratiquement constantes." [146]

Ainsi, en procédant comme Guye et Ratnowsky, ils déduisent des relations 3.22 à 3.25 les rapports des vitesses et des masses suivants

$$\frac{v'}{v} = \frac{V'I}{VI'}\,\frac{y'x}{yx'} \tag{3.26}$$

$$\frac{\mu'}{\mu} = \frac{I'^2V}{I^2V'}\,\frac{y^2x'}{y'^2x}. \tag{3.27}$$

Afin de comprendre l'étape suivante, nous récrivons ces relations comme le font Guye et Lavanchy dans la conclusion de leur article.

$$\frac{v'}{v} = \frac{V'y'}{I'x'}\,\left[\frac{Ix}{Vy}\right] \tag{3.28}$$

$$\frac{\mu'}{\mu} = \frac{I'^2x'}{y'^2V'}\,\left[\frac{Vy^2}{I^2x}\right]. \tag{3.29}$$

146. Guye et Lavanchy (1916, p. 297). Les variations relatives des intégrales de champ sont d'après l'étude expérimentale de Guye et Lavanchy de l'ordre de 1 pour 1000.

Sous cette forme, les grandeurs mesurées sur les rayons de comparaison et celles mesurées sur les autres séries de détermination (notées $'$) sont plus apparentes.

3.3.3 Vitesse des rayons de comparaison et détermination de l'intégrale de champ électrique

Comme avec Ratnowsky, Guye et Lavanchy doivent connaître une vitesse de référence v afin de déduire v' puis μ et μ'. Toujours dans le but de s'affranchir de la mesure de potentiels élevés, cette vitesse de référence, qu'ils nomment "vitesse absolue des rayons de comparaison"[147] ou plus simplement "vitesse de comparaison"[148], doit être déterminée au début de chaque série d'expériences. À un moment, ils sont contraints d'abandonner la série d'expériences qu'ils avaient commencé et dont ils avaient obtenu 83 clichés à des vitesses v'. Leur tube s'est déplacé par rapport au reste du dispositif, l'intégrale de champ magnétique est modifiée, il faut partir de nouveaux rayons de comparaison. Ils réalisent une nouvelle série de 67 expériences.

Le calcul de la vitesse de comparaison et la mesure des grandeurs de comparaison reposent sur le même principe que lors de l'expérience avec Ratnowsky, hormis l'utilisation de l'appareil photographique, mais Guye et Lavanchy explicitent davantage leur démarche. La relation 3.22 donne la valeur de v par

$$v = \sqrt{\frac{A}{x}\,\frac{\epsilon}{\mu_0}\,\frac{\mu_0}{\mu}\,V}. \tag{3.30}$$

Pour calculer la vitesse de comparaison il faut connaître A, $\frac{\epsilon}{\mu_0}$, x et V. Les deux dernières grandeurs sont mesurées sur les rayons de comparaison[149], la charge spécifique est connue par la mesure de Classen en 1908. Il reste à déterminer A. Ensuite, ces 4 grandeurs donnent une valeur approximative de v. Ils utilisent cette valeur pour calculer une première valeur de $\frac{\mu_0}{\mu}$ d'après chacune des théories. Injectée dans la relation 3.30, cela donne une nouvelle valeur de v et ils recommencent, par "approximations successives"[150] jusqu'à ce que la valeur de v ne soit plus sensiblement modifiée.

147. Guye et Lavanchy (1916, p. 368).
148. Guye et Lavanchy (1916, p. 294).
149. Guye et Lavanchy mesurent également y et I pour les rayons de comparaison.
150. Guye et Lavanchy (1916, p. 373).

Le calcul de A se fait selon la relation 3.21 que nous rappelons ci-dessous [151] :

$$A = 2\frac{U}{V}\frac{\mu}{(\mu)}x.$$

> "Sa mesure est très délicate, car elle nécessite la détermination de potentiels assez élevés, quoique très inférieurs à ceux mesurés dans la méthode de M. Hupka. Ces potentiels U étaient très voisins de 14.000 volts. Ils auraient donc pu encore être mesurés avec précision au moyen de l'électromètre absolu Bichat-Blondlot. Malheureusement, cet appareil ne se prête guère à des lectures rapides, telles qu'elles doivent être effectuées aux bornes d'un tube cathodique. Nous avons donc préféré nous servir pour ces déterminations de l'électromètre sous pression de MM. C.-E. Guye et A. Tscherniawsky qui ne fournit, il est vrai, que des valeurs relatives, mais qui est à lecture beaucoup plus rapide, et qui peut ensuite être étalonné facilement avec un électromètre absolu. Cet électromètre sous pression fonctionnait très normalement même pour des potentiels bien supérieurs à ceux que nous avions à mesurer. On choisissait du reste, pour effectuer les mesures, le moment où la régularité de l'émission cathodique était la plus grande possible." [152]

Les mesures qui permettent le calcul de A ne sont pas effectuées sur les rayons de comparaison, afin de "séparer les difficultés" :

> "Si nous avons choisi cette méthode, c'est qu'elle nous permettait de séparer les difficultés. Dans un premier groupe de mesure, celui qui nous a donné A, nous pouvions vouer tous nos soins à la détermination de U et V sans avoir à nous préoccuper de maintenir la vitesse v des rayons rigoureusement constante. Nous pouvions entreprendre ensuite le deuxième groupe qui nous donnait la mesures [sic] de x, y, V et I relatifs à la vitesse de comparaison [153], cette fois sans avoir à lire le potentiel de décharge au tube cathodique." [154]

La deuxième phrase de cette citation peut à première vue sembler paradoxale puisque c'est justement le potentiel de décharge qui détermine la vitesse des rayons. En fait, Guye et Lavanchy réalisent les mesures de U, V et x sur des rayons émis à

151. La notation y pour la déviation chez Guye et Ratnowsky est modifiée en x car il s'agit d'une déviation électrique.
152. Guye et Lavanchy (1916, p. 370).
153. Ce sont ces valeurs qui interviennent dans les relations 3.29 et 3.28. Leur mesure se fait en portant "toute l'attention [...] sur le réglage du fonctionnement même du tube de façon à obtenir pendant toutes les mesures des rayons homogènes de vitesse constante" (Guye et Lavanchy, 1916, p. 373).
154. Guye et Lavanchy (1916, p. 373).

des potentiels qu'ils ne se soucient que peu de maintenir rigoureusement constants. Comme les trajectoires suivies sont sensiblement identiques[155], les valeurs de A peuvent être considérées comme plusieurs mesures d'une seule et même grandeur.

Comme précédemment, le calcul de $\frac{\mu}{(\mu)}$ est effectué par approximations successives grâce à la relation de Schuster écrite comme[156]

$$v = \sqrt{2U \frac{\epsilon}{\mu_0} \frac{\mu_0}{(\mu)}}.$$

Considérant $\frac{\mu_0}{(\mu)} = 1$, on obtient une première valeur de v, dont on se sert pour calculer $\frac{\mu_0}{(\mu)}$, ce qui donne une nouvelle valeur de v, *etc.* "[P]ratiquement, la troisième approximation se confondait toujours avec la deuxième"[157]. La valeur de v obtenue après les approximations donne celle de $\frac{\mu}{(\mu)}$ pour chacune des théories. Guye et Lavanchy aboutissent finalement à une valeur de A pour chacune des théories.

Ils procèdent en fait à 8 mesures de A dans la première série d'expériences et 6 dans la seconde, obtenant par la moyenne de ces mesures une valeur de A dans chacune des séries. Cette valeur de A est utilisée pour le calcul de la vitesse de comparaison.

Pour les rayons de comparaison, les mesures de x, y, V et I qui conduisent à la vitesse de comparaison et au facteur entre crochet dans les relations 3.28 et 3.29, ne sont pas effectuées une seule fois mais résultent de moyennes arithmétiques effectuées sur 39 clichés contenant 4 déterminations pour la première série d'expériences et sur 17 clichés contenant eux aussi 4 déterminations pour la seconde série d'expériences.

3.3.4 Les résultats de Guye et Lavanchy

3.3.4.1 Présentation des résultats

Nous l'avons dit, les conclusions formulées par Guye et Lavanchy en septembre 1915 sont accueillies favorablement par l'ensemble des opinions exprimées. La formule de Lorentz-Einstein est vérifiée avec une très grande exactitude. Pour quantifier

155. Ceci est vérifié sur les clichés qu'ils prennent à chaque fois des déviations, dans ce cas uniquement électriques.

156. Dans l'article de 1916, cette partie contient une erreur de formule et est moins claire que dans sa correction qui paraît dans la thèse de Lavanchy. C'est la version corrigée qui est utilisée dans le mémoire de 1921.

157. Guye et Lavanchy (1916, p. 371). Nous avons vérifié cette affirmation quand nous avons repris ces calculs dans le but d'effectuer la réplication de l'expérience.

cette très grande exactitude, Guye et Lavanchy calculent l'écart entre la masse μ' issue des mesures et celle calculée d'après chacune des théories, pour la vitesse v' elle aussi issue des mesures. Ils proposent une représentation graphique semblable à celle proposée 5 ans plus tôt avec Ratnowsky.

Sur ce graphique, les 150 mesures de $(v'\,;\,\mu')$ sont classées par ordre croissant de vitesse, puis regroupées 6 par 6. Le graphique représente alors 25 points, chacun moyenne arithmétique de 6 points effectivement mesurés. Cela aboutit à une courbe plus lisse, qu'il compare aux courbes théoriques (Fig. 3.8).

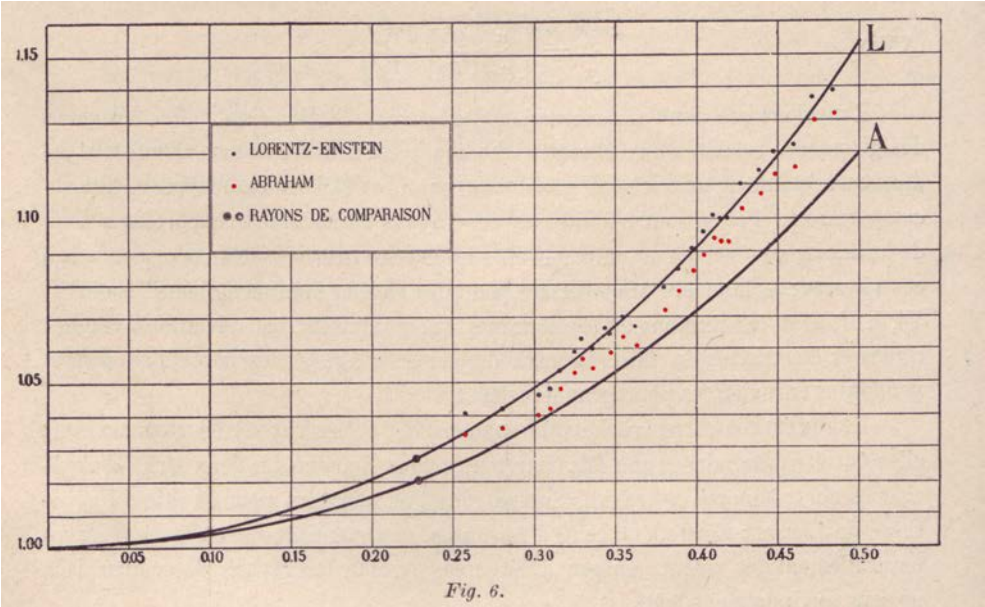

FIGURE 3.8 – Résultats des expériences de Guye et Lavanchy (GUYE et LAVANCHY, 1916, p. 446). Il faut lire ce graphique comme celui publié avec Ratnowsky (Fig. 3.7. Les points foncés (resp. les points vides), calculés dans l'hypothèse de Lorentz-Einstein (resp. d'Abraham) sont à comparer à la courbe théorique donnée par la formule de Lorentz-Einstein (resp. d'Abraham).

Les données publiées en 1921 permettent de représenter graphiquement les résultats des mesures et de les comparer aux formules théoriques [158]. Ce graphique "brut" donne une idée de la dispersion des mesures.

Guye et Lavanchy concluent leur article de 1916 par

> "En particulier si l'on fait la moyenne algébrique des écarts Δ pour chacune des deux théories (tableau général) on trouve :

158. Nous avons repris les valeurs de masse et de vitesse calculées par Guye et Lavanchy à partir des mesures. Les données brutes (de x', y', V', I' ... publiées par Guye en 1921 contiennent deux erreurs qui conduisent à des vitesse supérieures à c. Ce sont les mesures n^o 75 et 99.

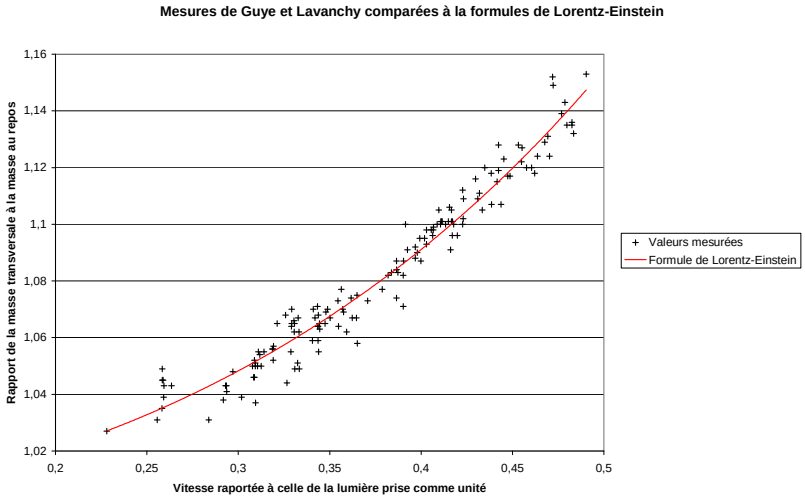

FIGURE 3.9 – À partir des 150 mesures présentées par GUYE (1921) nous avons retracé les variations *mesurées* de la masse transversale en fonction de la vitesse (dans l'hypothèse de Lorentz-Einstein).

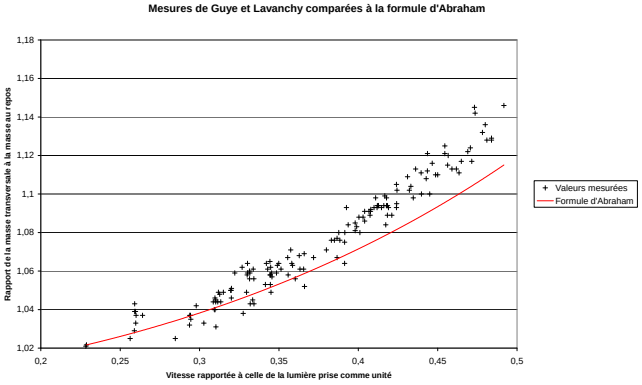

FIGURE 3.10 – À partir des 150 mesures présentées par GUYE (1921) nous avons retracé les variations *mesurées* de la masse transversale en fonction de la vitesse (dans l'hypothèse d'Abraham).

Lorentz-Einstein $\Delta_{moy} = +\ 0{,}0002$ [159] Abraham $\Delta_{moy} = +\ 0{,}0112$ [160]

L'écart algébrique moyen avec la formule d'Abraham est incomparablement plus grand qu'avec celle de Lorentz-Einstein, pour laquelle cet écart est *insignifiant*." [161]

3.3.4.2 Une présentation problématique

La présentation de Guye et Lavanchy ne laisse que peu de place à l'analyse du traitement qui est fait des grandeurs *effectivement* mesurées. Autrement dit, ils n'explicitent pas comment ils passent des mesures aux valeurs de la vitesse et de la masse. Or, pour pouvoir analyser la validité de leurs résultats et ainsi avoir un regard critique sur la précision de leur expérience, ce passage, le *traitement des grandeurs mesurées*, doit nécessairement être regardé de près.

Cela a-t-il été fait par les "critiques" contemporaines de l'expérience ? Nous n'avons retrouvé nulle trace d'une telle démarche. Seuls Faragó et Jánossy ont procédé à ce traitement. Mais, nous l'avons dit, ils se bornent à une analyse statistique de points considérés sans leur incertitude de mesure.

Il nous semble en tout cas peu concevable que l'affirmation de Guye et Lavanchy selon laquelle la formule de Lorentz-Einstein est vérifiée avec une précision de 0,02 %, puisse avoir été acceptée comme telle. Même si l'on admet qu'une analyse statistique du type Faragó et Jánossy ne faisait pas partie des "habitudes" dans les années 1920 et dans ce domaine particulier, une "analyse" fondée sur le calcul d'une moyenne *algébrique* des écarts ne pouvait certainement pas satisfaire les lecteurs de Guye et Lavanchy avec l'unanimité dont parle Einstein dans sa lettre du 18 avril 1922.

Dans cette partie, nous proposons donc d'analyser de façon explicite la précision de l'expérience de Guye et Lavanchy. Les tableaux regroupant l'ensemble des données d'expérience publiés en 1921 constituent la matière première de cette étude.

3.3.4.3 Traitement des grandeurs mesurées

D'après les relations données précédemment, Guye et Lavanchy doivent mesurer les déviations x, y, x', y', les tensions V, V', I, I' et le potentiel de décharge U. Cette dernière grandeur est mesurée avec l'électromètre sous pression.

159. C'est l'écart moyen algébrique entre les valeurs mesurées de la masse et celles calculées d'après les valeurs mesurées de la vitesse. Exprimé en %, il vaut donc un peu moins de 0,02 %.
160. Exprimé en %, il vaut donc un peu moins de 1,1 %.
161. Guye et Lavanchy (1916, p. 448 ; italiques originales).

Le premier groupe de données est mesuré sur les clichés. Mais il faut une référence connue pour pouvoir comparer entre elles ces mesures. Guye et Lavanchy tracent deux croix fines sur l'écran. Cela leur donne la référence dont ils ont besoin. Nous notons cette distance d. Ils mesurent ensuite l'écart qu'ils notent δ sur le cliché pour en déduire la déviation à l'écran [162].

La mesure des grandeurs électriques se fait avec un milliampèremètre de Siemens et Halske. Il s'agit donc d'une mesure d'intensité. Le schéma électrique du dispositif (Fig. 3.6) montre que la tension appliquée entre les armatures du condensateur est effectivement obtenue par la mesure de l'intensité I_V du courant qui traverse une résistance R branchée en dérivation sur la source de tension [163]. De plus, les valeurs I et I_V ne sont jamais déterminées de façon absolue mais toujours de façon relative, c'est-à-dire que Guye et Lavanchy ne mesurent que la déviation de l'aiguille du milliampèremètre dont l'échelle est fixée une fois pour toutes. Ils ne cherchent ainsi pas à déterminer la valeur de l'intensité en Ampère. Le réglage de la résistance R et du shunt s est effectué de sorte que toutes les valeurs de I et I_V soient inférieures au calibre du milliampèremètre.

Les déviations sur l'écran — qui interviennent dans les relations 3.27 et 3.26 — sont liées à celles mesurées sur les clichés par :

$$
\begin{aligned}
x &= X_{cliché}\ \frac{d}{\delta} \\
x' &= X'_{cliché}\ \frac{d}{\delta'} \\
y &= Y_{cliché}\ \frac{d}{\delta} \\
y' &= Y'_{cliché}\ \frac{d}{\delta'}.
\end{aligned}
$$

Les tensions de déviation V_i sont liées aux intensités correspondantes mesurées I_{V_i} par

$$V_i = R_i\ I_{V_i}.$$

Les intensités du courant qui circule dans les bobines I_i sont liées aux intensités

162. $x = \frac{d}{\delta} X_{cliché}$.
163. $V = R\ I_V$.

effectivement mesurées I_{mes}, à la résistance interne r du milliampèremètre et au shunt s en dérivation [164] par

$$I_i = \left(1 + \frac{r}{s}\right) I_{mes}.$$

Les relations 3.27 et 3.26 deviennent alors :

$$\frac{v'}{v} = \frac{R'}{R} \frac{I'_{V'}\ Y'_{cliché}}{I'_{mes}\ X'_{cliché}} \left[\frac{I_{mes}\ X_{cliché}}{I_V\ Y_{cliché}}\right] \tag{3.31}$$

$$\frac{\mu'}{\mu} = \frac{R}{R'} \frac{\delta'}{\delta} \frac{{I'_{mes}}^2\ X'_{cliché}}{{Y'_{cliché}}^2\ I'_{V'}} \left[\frac{I_V\ {Y_{cliché}}^2}{{I_{mes}}^2\ X_{cliché}}\right]. \tag{3.32}$$

De même, pour le calcul de l'intégrale de champ électrique A et de la vitesse de comparaison v, les relations 3.21 et 3.30 deviennent :

$$v = \sqrt{\frac{A}{X_{cliché}} \frac{\epsilon}{\mu_0} \frac{\mu_0}{\mu} I_V} \sqrt{\frac{\delta R}{d}} \tag{3.33}$$

$$A = \frac{2U}{I_V} \frac{\mu}{(\mu)} X_{cliché} \left(\frac{d}{R\delta}\right). \tag{3.34}$$

Guye et Lavanchy donnent une estimation de l'incertitude relative lors de la mesure des grandeurs $X_{cliché}$, $Y_{cliché}$, I_V, I, δ, d, et U. Pour les résistances R, ils ne le précisent pas mais affirment qu'elles ont "ont été à diverses époques soigneusement contrôlées avec une boîte Carpentier de haute précision" [165]. Celles-ci sont des boîtes de résistances standardisées, courantes à l'époque. Le constructeur affirme qu'elles peuvent atteindre des précisions inférieures à 1 pour 1000, soit 0,1 % [166].

Ainsi, la mesure des déviations se fait avec une précision relative de l'ordre de 1/300 [167]. La mesure au milliampèremètre se fait avec une précision de l'ordre 1/400 [168]. La mesure de δ et d se fait à environ 1/700 [169]. Le potentiel de décharge

164. Insistons sur le fait que r et s sont réglés une fois pour toutes.
165. Guye et Lavanchy (1916, p. 360).
166. Carpentier (1907, p. 1 ; fascicule 2).
167. Guye et Lavanchy (1916, p. 364).
168. Guye et Lavanchy (1916, p. 360).
169. Mesure d'une longueur d'environ 70 mm avec une règle graduée au $1/10^{me}$ de mm.

se mesure avec une précision de l'ordre de 1/150 [170].

Pour les 150 séries de déterminations à la vitesse v', la mesure de $X'_{cliché}$ et $Y'_{cliché}$ résultent d'une moyenne sur au moins dix déterminations. Il est difficile de savoir si l'argument de Guye selon lequel la précision est alors augmentée, puisque nous ne connaissons pas la dispersion des mesures. Autrement dit, nous ne savons pas si, lors de ces mesures, l'instabilité éventuelle demeure en dessous de la précision d'une mesure individuelle. Guye et Lavanchy ne le disent pas, sous-entendant que la stabilité de l'émission est suffisante [171]. La présentation du cliché constitue un autre argument.

De même, ils mesurent l'intensité et de la tension du système de déviation au début et à la fin d'une série de déterminations, à nouveau sans justifier que la variation entre les deux mesures peut être négligée.

Nous ne savons pas exactement comment un physicien des années 1920 pourrait traiter ces incertitudes. Nous venons cependant de soulever un point fondamental d'une telle analyse. La stabilité du phénomène est-elle maintenue à un niveau inférieur à l'incertitude sur chacune des mesures isolées ? Les éléments qui nous permettent de répondre précisément à cette question sont donnés par Guye en 1921.

Mais déjà en 1916, lui et Lavanchy affirment à plusieurs reprises que le grand nombre de mesures permet de réduire les incertitudes liées à l'instabilité intrinsèque du phénomène. Ils sous-entendent donc que celle-ci crée une incertitude relative supérieure à celle liée à chacune des grandeurs mesurées.

> "Nous donnons ci-après la valeur moyenne de notre vitesse de comparaison calculée avec des mesures effectuées sur environ 200 déviations du faisceau cathodique [...]
>
> Le grand nombre de mesures élimine presque totalement les erreurs fortuites, dont la principale résultat toujours de l'instabilité de l'émission cathodique." [172]

La mesure de la vitesse de comparaison et plus généralement des grandeurs de comparaison, citée par Guye comme exemple de grandeur mesurée un très grand nombre de fois, est fondamentale dans la méthode des trajectoires (presque) identiques. Elles déterminent en effet toutes les mesures, comme le montrent les relations 3.29 et 3.28.

Guye et Lavanchy en sont très conscients.

170. Guye et Lavanchy (1916, p. 369).
171. Guye et Lavanchy (1916, p. 355).
172. Guye et Lavanchy (1916, p. 373).

> "Quand aux valeurs des vitesses de comparaison qui figurent à la première ligne de chaque tableau, elles résultent également d'un très grand nombre de mesures faites dans des conditions expérimentales particulièrement faciles et favorables, puisqu'il s'agissait de rayons cathodiques lents, ainsi que nous l'avons exposé au cours de ce mémoire." [173]

Plus loin, ils continuent.

> "Il en résulte que l'incertitude qui peut entacher les grandeurs entre crochets des formules [3.29] et [3.28] doit être très faible. Indépendamment des conditions particulièrement favorables dans lesquelles ces déterminations sont effectuées, elles ont comporté un très grand nombre de mesures, de façon à éliminer aussi complètement que possible les causes d'erreur qui peuvent provenir des variations de dureté du tube au cours d'une expérience, si rapide soit-elle." [174]

3.3.5 Guye, Ratnowsky, Einstein et la méthode des trajectoires identiques

Dans la lettre que Guye envoie à Einstein le 21 janvier 1920 [175], il écrit :

> "Si les résultats obtenus me paraissent avoir quelque valeur, je pense qu'il faut l'attribuer surtout à la méthode des trajectoires identiques qui élimine complètement l'incertitude résultant du calcul des intégrales de champ." [176]

À nouveau, c'est la méthode des trajectoires identiques que Guye met en avant. Cinq ans plus tôt, le 1^{er} juillet 1915, Guye et Lavanchy présentaient leurs premiers résultats devant la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève.

> "Il y a quelques années, M. Guye a indiqué une méthode particulièrement appropriée à l'étude de la variation d'inertie des électrons en fonction de la masse. Cette méthode, dite des *trajectoires identiques*, a fait l'objet d'une première étude expérimentale en collaboration avec M. Ratnowsky." [177]

Dans le mémoire de 1921, Guye s'attribue à nouveau la paternité de la méthode, responsable selon lui du succès de l'expérience.

173. Guye et Lavanchy (1916, p. 442).
174. Guye et Lavanchy (1916, p. 447-448).
175. Einstein (2004, Lettre 273).
176. Les autres éléments que Guye souligne sont l'utilisation du rapport $\frac{\epsilon}{\mu_0}$, seule valeur absolue qui intervient dans les calculs, la mesure d'un potentiel de décharge peu élevé et donc "facilement mesurable", et l'"enregistrement photographique" qui "supprime toute autosuggestion possible".
177. Guye et Lavanchy (1915b, p. 166 ; italiques originales).

> "L'idée me vint alors de chercher à attaquer le problème par l'étude des rayons cathodiques de grande vitesse. Mais la production de ces rayons, que l'on ne peut obtenir que dans des vides très poussés, présente du point de vue expérimental de sérieuses difficultés. En outre, il faut faire le choix d'une méthode qui permette avec une exactitude aussi grande que possible de déceler la différence entre les deux théories. Après examen attentif des dispositifs les mieux appropriés au but à atteindre, je me suis arrêté à la méthode que j'ai appelée *méthode des trajectoires identiques* [...]" [178]

Dans la reconstruction historique que propose Guye, il est à l'initiative de cette expérience qui vient prouver les prédictions de la théorie de la relativité, et dont le succès doit lui être attribué puisque c'est lui qui a mis au point la méthode sur laquelle repose cette preuve. Ratnowsky et Lavanchy sont des collaborateurs respectivement "dévoué" [179] et "aussi consciencieux qu'habile" [180].

Pourtant, dans sa lettre à Adler du 20 octobre 1918, Einstein écrit :

> "[L'expérience] de Guye et Lavanchy d'après la *méthode de Ratnowsky*" [181]

Six mois plus tôt, dans une lettre à Heinrich Zangger, il écrit que Ratnowsky ferait un bon remplaçant de Hermann Weyl au poste de professeur de physique théorique à l'École polytechnique fédérale de Zürich.

> "Aussi, quand Weyl sera parti de Zürich, il n'y aura plus de professeur de physique théorique. Il faut alors également penser à Ratnowsky. Il est si compétent qu'il mérite une position stable à l'École. Son idée, *que Guye lui a volée* [182] était vraiment belle et il fait surtout souvent preuve d'une certaine originalité." [183]

Ainsi, pour Einstein, la méthode des trajectoires identiques telle qu'utilisée par Guye et Ratnowsky entre 1907 et 1910 doit être attribuée à l'étudiant plutôt qu'au professeur, traité de voleur. Einstein tient certainement cette interprétation de Ratnowsky lui-même qu'il a rencontré à l'Université de Zürich en 1911.

178. Guye (1921, p. 274 ; italiques originales).
179. Guye (1921, p. 274).
180. Guye (1921, p. 276).
181. Einstein (1997, Lettre 636 ; nous soulignons).
182. Le mot *gestohlen* est coupé ("truncated"). Nous n'avons pas consulté la lettre originale et nous reposons sur l'équipe des *Collected papers of Albert Einstein.*
183. Einstein (1997, Lettre 571) : "Wenn nun Weyl auch von Zürich weg geht, ist kein Professor für theoretische Physik mehr dort. Dann soll man aber auch an Ratnowski [sic] denken. Er taugt immerhin soviel, dass er eine stabile Stellung an der Hochschule verdient. Seine Idee, die ihm Guye ge..... hat war gewiss schön, und er bringt überhaupt öfter einigermassen Originelles hervor."

> "J'ai vu aujourd'hui un jeune physicien, Ratnowsky, que j'ai appris à connaître et à apprécier depuis quelques semestres." [184]

Nous n'avons pas les moyens de tirer cette "querelle" au clair. Ratnowsky recherche un poste stable depuis 1912-1913 [185]. À Zurich, il côtoie Einstein et von Laue [186] à qui il parle de sa thèse sur l'inertie des électrons. De son côté, Guye a effectivement dû modifier la méthode des trajectoires identiques originale pour l'adapter aux modifications du dispositif. Les deux cherchent visiblement chacun de leur côté à tirer parti de l'idée ce qui souligne bien son originalité et sa pertinence.

184. Einstein (1993, Lettre 422, le 5 novembre 1912) :"Heute war ein junger Physiker, namens Ratnowski [sic], den ich seit einigen Semestern kennen schätzen gelernt habe, bei mir."
185. Voir la lettre d'Einstein citée précédemment.
186. Dans sa préface à la seconde édition de *Das Relativitätsprinzip* en 1913, von Laue remercie Ratnowsky pour la correction. En référence à l'expérience de Guye et Ratnowsky, il cite d'ailleurs en premier sa thèse, puis l'article de 1911.

Conclusion

Les nombreux honneurs et gages de reconnaissance que Guye reçoit dans les années 1920 sont principalement dus au succès de l'expérience qu'il mène avec Charles Lavanchy entre avril 1913 et juillet 1915. Celle-ci doit être considérée dans la continuité du travail réalisé entre 1907 et 1910 en collaboration avec Simon Ratnowsky, dont elle constitue de fait une amélioration.

Des électrons produits et accélérés dans un tube cathodique atteignent une vitesse comprise entre 20 et 48 % de celle de la lumière dans le vide. Ils sont ensuite déviés successivement dans un champ électrique puis magnétique. Les équations de la dynamique, développées selon la méthode dite des *trajectoires identiques* permettent ensuite de déterminer la vitesse et la masse de ces particules puis de comparer ces "mesures" aux formules de Lorentz-Einstein et d'Abraham.

La mise au point puis l'utilisation de la méthode des trajectoires identiques par Guye et Ratnowsky permet de s'affranchir des difficultés qui fondent les critiques formulées à l'encontre des travaux de Kaufmann et Hupka. La connaissance précise de la géométrie du dispositif n'est pas nécessaire. Les inhomogénéités des champs électrique et magnétique sont prises en compte sans qu'il soit nécessaire de les quantifier. Les potentiels les plus élevés mesurés ne dépassent pas 14 kV. En revanche, de par son principe même — travailler sur des déviations constantes, des incertitudes empêchent Guye et Ratnowsky de conclure à la validité de la formule de Lorentz-Einstein. Le pointé est peu précis, et le temps de manipulation trop long ne permet pas d'assurer une stabilité suffisante du phénomène d'émission cathodique.

C'est dans le but de résoudre ces difficultés que Guye applique une démarche familière : reprendre le dispositif et la méthode pour les améliorer. Pour cela, il n'est plus question d'observer les déviations directement sur le fond du tube. Guye et Lavanchy utilisent donc l'enregistrement photographique des déviations. Les déterminations sont beaucoup plus rapides, assurant de fait une meilleure stabilité du phénomène. Mais elles ne sont plus rigoureusement constantes. L'analyse théorique et expérimentale des modifications induites par cette nouvelle façon de procéder montre la validité de la nouvelle démarche. La méthode des *trajectoires identiques* est devenue la méthode des *trajectoires* presque *identiques*.

Guye et Lavanchy réalisent alors 150 clichés comportant chacun plus de 10 double-déviations électrique et magnétique, contre 27 seulement à Guye et Ratnowsky. Ces clichés montrent une stabilité de l'émission assez remarquable et offrent

une lisibilité spectaculaire en comparaison de ceux de Kaufmann. Ils affirment alors en juillet et septembre 1915 avoir vérifié la formule de Lorentz-Einstein sans plus de doute sur leurs mesures. Cette conclusion est acceptée dès 1916 par Einstein, puis reprise dans les années 1920 par de nombreux auteurs dont certains vont jusqu'à féliciter directement Guye.

Celui-ci a bien compris qu'il a alors entre les mains l'outil indispensable d'une reconnaissance internationale. Dans le mémoire qu'il publie en 1921, mais auquel il travaillait depuis 1917, il se présente alors comme le physicien ayant réussi à enfin asseoir sur des bases expérimentales solides le principe de relativité. Sûr de son fait, il fait publier l'intégralité des mesures dont lui et Lavanchy se sont servis pour interpréter leurs observations. Il prend également une posture de "diffuseur" de la théorie d'Einstein auprès des "non-spécialistes" en intégrant à ce mémoire de nombreuses tables de valeurs des masses en fonction de la vitesse, des rappels de diverses formules et de données numériques des caractéristiques de l'électron.

Mais l'analyse que nous proposons dans cette partie soulève des difficultés dans cette idylle entre Guye, la relativité et Einstein [187]. En premier lieu et malgré une relation visiblement cordiale entre les deux hommes, ce dernier présente le genevois comme s'étant injustement approprié la méthode des trajectoires identiques aux dépens de Ratnowsky.

De plus, l'image d'un Guye ayant su percevoir très rapidement l'importance de la théorie de la relativité est à reconsidérer. Il propose en effet dès 1909 que soit décerné à Einstein le titre de docteur *honoris causa*, mais il restera encore très prudent quant à la nouvelle théorie, présentant ses expériences dans un cadre avant tout électromagnétique et du point de vue des théories électroniques jusqu'en 1916. Ce n'est en effet qu'en 1917 qu'il semble se ranger du côté des partisans de la relativité.

Enfin, son affirmation selon laquelle la formule de Lorentz-Einstein est vérifiée avec une précision de 0,02 % pose clairement problème d'un point de vue scientifique, ce nombre étant issu d'une moyenne arithmétique.

Ce dernier point nous ramène encore une fois à la question posée dans les deux parties précédentes. Comment un physicien des années 1920 peut-il être amené à

187. C'est souvent sous une forme idéalisée que Guye est présenté par les quelques historiens à s'être penchés sur ce personnage. Cette vision des choses est malheureusement encore de nos jours reprise telle quelle, en présentant par exemple Guye comme un "visionnaire" qui a su donner un doctorat *honoris causa* avant tout le monde à Einstein, dont il était selon eux un "ami".

considérer l'expérience de Guye et Lavanchy comme un succès ? Dans cette partie, nous avons certes soulevé des problèmes, mais l'étude que nous avons proposée de l'expérience de Guye et Lavanchy révèle des aspects qu'il nous faut prendre en compte dans une évaluation historique de celle-ci.

La méthode expérimentale permet effectivement de s'affranchir des difficultés connues alors dans le domaine des mesures de précision sur les rayonnements électroniques de grande vitesse. De plus, Guye et Lavanchy parviennent à réaliser les mesures de façon systématique, ce qui leur donne la possibilité d'en effectuer un très grand nombre. C'est précisément là le point fort de leur argumentation. Un grand nombre de mesures effectuées rapidement permet de calculer les moyennes permettant de tenir compte de la dispersion inhérente au phénomène de l'émission cathodique. Les clichés qu'ils présentent alors, de grande taille et bien définis, justifient la stabilité à laquelle ils sont parvenus et donc la maîtrise du phénomène dont ils font preuve, ainsi que la précision inédite — selon eux — de leurs mesures.

Dès lors, nous avançons l'hypothèse selon laquelle les expériences de Guye et Lavanchy sont considérées comme preuve valide de la formule de Lorentz-Einstein car ce sont les "plus précises *de toutes*"[188]. Dans cette affirmation d'Einstein, nous soulignons "*de toutes*" car c'est bien relativement aux autres expériences que celle réalisée à Genève est jugée.

Autrement dit, et cela est confirmé par l'étude que nous venons de présenter dans cette partie, Guye et Lavanchy sont parvenus à obtenir une précision que leurs contemporains ne pensent alors pas voir dépassée. L'affirmation de l'expérimentateur Starke prend alors tout son sens. Nous la rappelons :

> "je vous prie, Mr. le professeur, de vouloir me permettre la demande empressée d'un exemplaire de votre mémoire sur la vérification de la formule de Lorentz-Einstein que vous avez donnée avec Mrs. Ratnowsky et Lavanchy, *d'une façon qui à ce qu'il me semble ne peut pas être surpassée*."[189]

Dans la partie suivante, nous présentons la reconstruction que nous avons réalisée de l'expérience de Guye et Lavanchy. Nous y proposons une approche différente de celle développée ici, plus proche de la réalisation effective de l'expérience, et nous développons des arguments supplémentaires à l'appui de notre hypothèse.

188. Lettre d'Einstein à Guye le 18 avril 1922.
189. Cette lettre est conservée au MHS sous la référence Z281/2 n^{o}5. C'est nous qui soulignons.

4

Réplication de l'expérience de Guye et Lavanchy

Sommaire

Introduction 202

4.1 Reconstruction du tube cathodique : première étape de la réplication 204

4.1.1 Objectifs 204

4.1.2 Utilisation d'une source textuelle : la description du tube faite par Guye et Lavanchy 206

4.1.2.1 Description originale 206

4.1.2.2 Analyse de la description originale 207

4.1.3 Observations du tube cathodique original 209

4.1.3.1 Conditions de l'observation 209

4.1.3.2 L'enceinte de verre 210

4.1.3.2.1 Les traversées 210

4.1.3.2.2 Un élément non décrit 212

4.1.3.2.3 Assemblage des différentes parties de l'enceinte 214

4.1.3.3 Les électrodes 214

4.1.3.3.1 La cathode 214

4.1.3.3.2 L'anode 215
4.1.3.4 Le dispositif de déviation électrique 216
4.1.4 Construction d'une copie du tube cathodique original . . . 218
4.1.4.1 Ecarts liés à des contraintes techniques 221
4.1.4.1.1 Composition du verre 221
4.1.4.1.2 Les traversées verre/métal 221
4.1.4.1.3 Montage de l'écran 222
4.1.4.1.4 La connexion entre l'anode et la traversée. 222
4.1.4.2 Autres solutions apportées 223
4.1.4.2.1 La connexion entre le ressort et l'anode . 223
4.1.4.2.2 Le diaphragme 223
4.1.4.2.3 Les plateaux du condensateur 224
4.2 Premières expérimentations ; mise en évidence d'une problématique expérimentale spécifique : la technique de production des rayons cathodiques 226
4.2.1 Objectifs 226
4.2.2 Réaliser l'émission cathodique avec la copie du tube de Guye et Lavanchy 227
4.2.2.1 Mise au point d'un *dispositif minimal* et premières tentatives d'utilisation du tube 227
4.2.2.1.1 Le dispositif minimal 227
4.2.2.1.2 Premières tentatives 227
4.2.2.2 De l'observation de *phénomènes électriques dans l'air* à la production et à l'observation du rayonnement cathodique 229
4.2.2.2.1 Utilisation d'une source primaire : *Les rayons cathodiques* de Paul Villard 229
4.2.2.2.2 Retour à notre dispositif 232
4.2.2.3 Analyse 236
4.2.2.4 Améliorations du dispositif et retour sur la stabilité de l'émission 238
4.2.2.4.1 Construction du dispositif de compensation du champ magnétique terrestre . . . 238
4.2.2.4.2 Stabilité de l'émission 242
4.2.3 Transposer la technique expérimentale originale de production des rayons cathodiques à notre dispositif 244
4.2.3.1 Régler le dispositif selon Guye et Lavanchy 244
4.2.3.2 Contrôler l'émission avec notre dispositif 247

4.3 Prise de mesures 254
4.3.1 Objectifs 254
4.3.2 Déviations électrique et magnétique des rayons cathodiques 255
4.3.2.1 Les bobines magnétiques 255
4.3.2.2 Les alimentations des bobines et du condensateur 256
4.3.2.3 Les interrupteurs et commutateurs 258
4.3.3 Les mesures dans le dispositif de Guye et Lavanchy 259
4.3.3.1 Organisation chronologique de la réplication, contraintes de temps et contraintes matérielles. 259
4.3.3.2 Mesure de l'intensité et de la tension de déviation 261
4.3.3.3 Dispositif de visualisation et d'enregistrement des déviations 263
4.3.4 Le dispositif reconstruit : synthèse 272
4.3.4.1 Quelques photos 273
4.3.4.2 Comparaison entre le dispositif original et sa copie 273
4.3.5 Reconstruction de l'activité de mesure 276
4.3.5.1 Rappels : le protocole expérimental décrit par Guye et Lavanchy 277
4.3.5.2 Première tentative de mesures : mise en évidence de certaines difficultés 283
4.3.5.3 Deuxième série de mesures : réalisation de mesures systématiques 290
Conclusion 297

> "*Réplication : Action de doubler, doublement.*
> *Réplication : Terme de biologie. Dans une cellule, duplication, copie d'une chaîne d'ADN.*
> *Reconstruire : Il se conjugue comme construire. Rebâtir, relever un édifice.* "[1]

Introduction

Dans la première partie, nous avons réalisé une synthèse des recherches historiques sur la problématique de la *variation de l'inertie avec la vitesse au début du XX^{e} siècle*. Dans la seconde partie, nous avons étudié *la carrière scientifique de Guye*. Enfin, dans la partie précédente, nous avons analysé *ses recherches sur la variation de l'inertie des électrons* avec la vitesse à partir de ses publications et de sa correspondance.

Dans cette quatrième partie, nous proposons une analyse de l'expérience de Guye et Lavanchy, à partir de notre travail de *réplication* de celle-ci.

Aborder l'histoire des sciences expérimentales par l'étude d'instruments scientifiques conservés dans les collections des Musées d'Histoire des sciences et des Universités ou Instituts scientifiques, et se confronter à l'expérience dans un but historique, constituent des démarches dont la fécondité est démontrée par de nombreux travaux historiques[2]. Notre travail s'inscrit résolument dans ce cadre. Pratiquement, nous avons bénéficié d'une collaboration étroite avec le Musée d'Histoire des Sciences de Genève, ce qui nous a permis d'avoir à disposition un certain nombre d'instruments utilisés par Guye au cours de ses recherches. De même, nous avons travaillé au sein de l'Ecole de Physique de la Faculté des Sciences, ce qui nous a facilité l'accès à ses archives matérielles, plus ou moins bien conservées, plus ou moins accessibles et plus ou moins exploitables.

1. Émile Littré (2003, volume 5 et supplément).
2. Voir par exemple les recherche de Heering sur la balance de Coulomb (Heering, 1992), (Heering, 1994), (Heering, 2006) ; voir également les réplications de Jan Frercks sur la mesure de la vitesse de la lumière par Fizeau (Frercks, 2000), de James MacLachlan sur les expériences de Galilée (MacLachlan, 1976), (MacLachlan, 1998), d'Elizabeth Cavicchi sur les phénomènes magnétiques (Cavicchi, 2002), de Heering sur le calorimètre de Lavoisier (Heering, 2005), et en chimie celle de Usselman, Reinhart et Foulser sur les expérience d'analyse de composés organiques par Liebig (Usselman *et al.*, 2005). Plus généralement, nous renvoyons le lecteur au numéro spécial des *Archives des sciences* consacré à l'utilisation de la méthode de réplication en histoire des sciences : 'Special issue : the replication method in history of science', *Archives des sciences*, **58**(2), 2005.

Avoir accès à de tels lieux, riches en sources instrumentales, n'est cependant pas une condition suffisante pour enrichir une recherche historique. Comment travailler avec ces sources ? La *méthode de réplication* se propose de donner un cadre dans lequel un tel travail serait possible [3]. Plus précisément, une *réplication* d'expérience consiste à *re*construire un dispositif expérimental avec lequel l'historien *re*fait une expérience dans le but d'obtenir des informations d'ordre historique sur une méthode ou une technique expérimentales, ou sur un épisode dans lequel cette expérience a joué un rôle. Ainsi, dans ce cadre méthodologique, les sources instrumentales peuvent être étudiées de plusieurs façons. Certaines peuvent être utilisées directement, la plupart sont reconstruites. Quoi qu'il en soit, l'idée est de travailler à refaire une expérience à partir de l'instrument original ou de sa copie. Ainsi, l'étude de ce type de sources ne se fait plus seulement par l'observation mais par la reconstruction et la réutilisation d'un instrument, d'un dispositif.

Une telle démarche n'est pas sans risque du point de vue de la pertinence historique [4]. Par exemple, l'utilisation d'un instrument scientifique du début du XX*e* siècle par un historien formé à la physique cent ans plus tard n'est pas sans poser de nombreuses questions quant aux biais nécessairement introduits par cet utilisateur moderne d'un instrument ancien. Que dire alors de l'utilisation d'une copie, d'un instrument reconstruit un siècle après ? Comment traiter, dans l'analyse historique, les intentions de l'historien, nécessairement différentes de celles de l'utilisateur et du concepteur originaux ? Et finalement, que faire de ces différences, de ces écarts à une certaine réalité passée, dans l'analyse que propose l'historien ?

Nous souhaitons dans cette partie fournir au lecteur des éléments susceptibles d'enrichir une réflexion sur la "méthode de réplication". Pour cela, nous adoptons un mode de présentation particulier. De la construction d'une copie du tube cathodique à la reconstruction de l'activité de mesure, nous présentons notre "démarche de réplication" de façon linéaire, laissant ainsi percevoir nos errements, nos erreurs, les difficultés rencontrées, les choix que nous avons dus faire. Outre l'intérêt — que nous espérons susciter — de déjà percevoir comment s'est effectivement déroulé notre travail, cette présentation montre comment la réplication d'expérience permet de mettre à jour des problèmes, des questions, des aspects d'ordre expérimental, dont l'historien n'a pas, ou pas complètement, conscience à travers la seule étude

3. Nous reprenons l'expression utilisée par Peter Heering, et plus généralement par l'équipe à laquelle il appartient, le Groupe de Didactique et d'Histoire de la Physique de l'Université Carl von Ossietzky à Oldenburg en Allemagne. Voir Heering (2006).

4. Voir par exemple la discussion entamée par Pestre (1994).

des textes.

4.1 Reconstruction du tube cathodique : première étape de la réplication

4.1.1 Objectifs

Le dispositif expérimental utilisé par Guye et Lavanchy comporte un grand nombre d'instruments et appareils : tube cathodique, machine électrostatique, pompe à vide, interrupteurs, alimentations en courant et tension, dispositif photographique, dispositif de compensation du champ magnétique terrestre, bobines. Cette multitude d'appareils entraîne une complexité dans la démarche de réplication, qui nous imposait de procéder à des choix raisonnés dans les instruments à reconstruire en premier lieu.

Le tube cathodique nous est apparu comme l'instrument central, lieu de production du phénomène à produire, maîtriser et mesurer. Il s'agit également d'un instrument unique en ce sens qu'il a été construit au sein du laboratoire de physique dirigé par Guye dans le seul but de réaliser cette expérience. A ce titre, il était exclu d'utiliser un tube moderne, nécessairement différent. La première étape de la réplication a donc été de reconstruire ce tube, ou, pour être plus précis, d'en construire une copie aussi fidèle que possible.

Nos objectifs ne se limitaient cependant pas uniquement à l'obtention d'une réplique du tube. Il s'agissait en effet également de se donner les moyens d'une analyse des conditions, des enjeux et des difficultés propres à un travail de réplication d'un instrument ancien. Nous disposions pour cela d'un angle d'approche intéressant puisque, d'une part, le tube est décrit assez précisément dans l'article de Guye et Lavanchy de 1916 [5] et que des photographies sont annexées au *Mémoire* rédigé par Guye en 1921 [fig. 4.2], et d'autre part, le Musée d'Histoire des sciences de Genève possède deux exemplaires de tubes utilisés par Guye et ses étudiants, et réunis par lui dans un coffret, *a priori* destinés à être exposés suite à ses travaux [fig. 4.1]. Nous pouvions ainsi espérer comprendre comment ces deux types de sources, textuelles et matérielles, pouvaient être utilisées ensemble dans un travail de réplication.

5. Guye et Lavanchy (1916).

FIGURE 4.1 – Coffret contenant deux exemplaires des tubes utilisés par Guye, Ratnowsky et Lavanchy. Ce coffret est conservé au Musée d'histoire des sciences de Genève

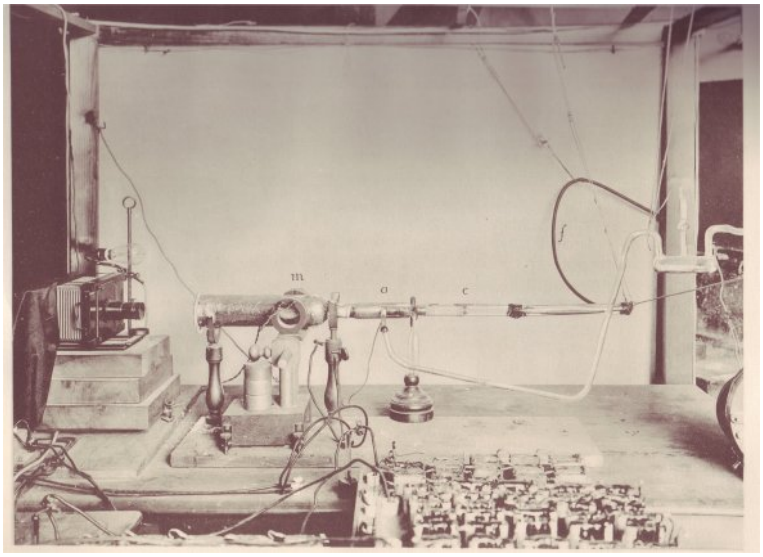

FIGURE 4.2 – Photographie du tube cathodique donnée dans le mémoire de 1921. GUYE (1921)

4.1.2 Utilisation d'une source textuelle : la description du tube faite par Guye et Lavanchy

4.1.2.1 Description originale

Nous donnons en premier lieu la description complète telle que présentée dans l'article de 1916.

> "2. *Tube cathodique.*—Nous avons, après un certain nombre d'essais, adopté pour notre tube définitif la forme donnée par la figure ci-dessous [fig. 3.5].
>
> Ce tube a une longueur totale de 80 c/m environ. Son diamètre, qui est de 3 c/m au voisinage de la cathode, augmente près de l'anode ; et c'est dans un cylindre de 8 c/m de diamètre environ que passe le faisceau dévié.
>
> Pour faciliter le montage et le réglage des pièces placées à son intérieur, le tube était composé de deux parties réunies par un rodage ; un disque en verre également rodé le fermait à son extrémité. Les joints de ces trois pièces ont été rendus parfaitement étanches au moyen d'une cire blanche, sorte de cire à cacheter très fine et très adhérente.
>
> La cathode *c* était en aluminium. D'autres métaux, essayés au cours de nos recherches préliminaires, et notamment le cuivre et le laiton, nous donnèrent rapidement, par suite de leur désintégration, des dépôts métalliques sur la paroi interne des tubes qui devenait ainsi conductrice. L'anode était constituée par un cylindre de laiton B relié à la terre. Un diaphragme *d* percé à son centre d'une ouverture circulaire de 0,2 m/m de diamètre et fixé à l'intérieur du cylindre anode limitait l'émission cathodique à un très mince faisceau. A ce tube anode était directement fixé un second cylindre de laiton D, de plus grand diamètre, et destiné à supporter les pièces du condensateur produisant la déviation électrique.
>
> Nous avons en outre recouvert de papier d'étain, également relié à la terre, la partie du tube comprise entre l'anode et le fond ; cette partie est recouverte de hachures dans le schéma général [voir fig. 3.6].
>
> Ainsi les rayons cathodiques pénétraient, à une distance de 10 c/m de la cathode, dans un cylindre de Faraday constitué par les cylindres B et D et par le papier d'étain ; dans ces conditions, le faisceau cathodique était soustrait sur la presque totalité de son parcours à l'action des champs électrostatiques extérieurs.
>
> On avait fixé sur la plaque de verre fermant le tube un écran E au tungstate de calcium, cette substance jouissant de la propriété de donner, sous l'influence du faisceau cathodique, une fluorescence bleue très actinique au point de vue photographique. Sur cette substance étaient tracés deux repères permettant, comme on le verra plus loin, de déterminer l'échelle des clichés photographiques obtenus dans les mesures. Enfin, le vide à l'intérieur du tube s'obtenait par

une pompe de Gaede combinée avec une pompe à enveloppe, dispositif du reste très courant actuellement dans les laboratoires. Nous avons remarqué très nettement, quoique d'une façon qualitative seulement, au cours de nos recherches préliminaires, la relation existant entre la distance cathode-anode et le degré de vide nécessaire à l'émission d'un faisceau cathodique de vitesse déterminée.

Ce sont en partie ces constatations qui nous ont amenés à adopter plusieurs des dimensions de notre tube. Nous avons ainsi, sans qu'il soit nécessaire de faire usage d'air liquide ou de charbon, et sans l'intervention d'éclairage ultraviolet, obtenu des rayons de très grande vitesse." [6]

"4. *Champ électrique.*—Le condensateur produisant le champ électrique était composé de deux plateaux PP de laiton de forme spéciale. Les dimensions étaient approximativement les suivantes : 2,4 c/m × 5 c/m. La surface de ces plateaux n'était pas plane, mais cintrée comme l'indique la [fig. 3.5]. Cette forme spéciale paraît présenter plusieurs avantages. Elle rend la méthode des trajectoires identiques plus rigoureuse qu'avec un condensateur plan puisque la forme des surfaces équipotentielles se rapproche ainsi de celle de la trajectoire parcourue par les faisceaux cathodiques. La force agissante étant alors en chaque point, plus exactement normale à la direction de marche de l'électron, celui-ci conserve de ce fait, pendant son passage dans le champ électrique, une vitesse plus rigoureusement constante. Enfin, cette courbure a surtout un avantage pratique : en éliminant l'incertitude provenant du passage du faisceau cathodique très près des bords des plateaux, elle permet d'opérer avec sécurité sur de plus grandes déviations. Dans nos expériences, la distance des deux plateaux était de 4,5 m/m à l'entrée du faisceau et de 9 m/m environ à l'autre extrémité.

Ces plateaux étaient supportés par deux tiges métalliques fixées elles-mêmes au moyen d'anneaux d'ébonite au cylindre D [fig. 3.5]. Ces tiges étaient mises en relation avec l'extérieur par deux fils conducteurs traversant le verre. Le cylindre D pouvait être retiré du tube sans trop de difficultés ; nous sommes arrivés ainsi à faire un réglage très exact de nos plateaux avant leur mise en place, ce qui est absolument impossible quand ces derniers sont fixés directement et définitivement au tube." [7]

4.1.2.2 Analyse de la description originale

Il apparaît tout d'abord que la description de l'*objet* 'tube cathodique' est présentée en deux parties : le tube cathodique en tant qu'instrument de production du phénomène de rayonnement cathodique, puis le dispositif de déviation électrique

6. Guye et Lavanchy (1916, p. 355-357).
7. Guye et Lavanchy (1916, p. 358).

qui est inséré physiquement à l'intérieur de l'enceinte de verre. L'objectif étant de reconstruire l'enceinte et son intérieur, nous utilisons nécessairement les deux descriptions. Il est à noter que dans l'article publié en 1916, elles ne se suivent pas immédiatement, ce qui sera rectifié à l'occasion de la publication de la thèse de Lavanchy en 1917 puis du *Mémoire* de 1921. Cette modification est l'une des rares modifications apportées après 1916 à la structure et au contenu du premier article complet sur l'expérience. Elle souligne ainsi l'unité matérielle entre le dispositif de production des rayons cathodiques et celui de déviation électrique.

La lecture de ces descriptions montre ensuite que, loin de se limiter à une description de la géométrie ou des matériaux utilisés, Guye et Lavanchy semblent prêter une attention particulière à certains aspects précis de la construction. En effet, après avoir donné les dimensions des différentes pièces et la nature des matériaux utilisés, ils mettent en avant les précautions prises pour se prémunir d'actions extérieures perturbatrices, et les choix effectués dans le but de rendre l'étude du phénomène aussi rigoureuse que possible.

Ainsi, le tube est recouvert de papier d'étain relié à la terre, sur toute sa surface entre l'anode et l'extrémité du tube à laquelle est placé l'écran, afin de réaliser une protection contre les influences électrostatiques extérieures. Les fixations des plateaux du condensateur sont également soigneusement isolées électriquement par l'utilisation d'anneaux d'ébonite. Cette précaution est nécessaire, car les plateaux étant fixés au cylindre D lui même relié au cylindre anode en connexion électrique avec la terre, il faut s'assurer de l'isolation électrique entre la terre et le condensateur.

Le choix des matériaux a été effectué après des essais destinés à vérifier l'adéquation entre ceux-ci et le fonctionnement attendu du tube lors de l'émission. La cathode est en aluminium afin de se prémunir de tout effet d'éjection de particules vers les parois du tube qui deviendraient conductrices. La distance inter-électrodes est choisie là encore après des essais ayant visiblement eu pour but de déterminer la distance idéale à la production de l'émission cathodique. La taille du diaphragme est choisie de sorte que le faisceau soit suffisamment fin et que, par là, les impacts sur l'écran soient suffisamment définis. L'enregistrement de ceux-ci par un appareil photographique est rendu possible par l'utilisation de tungstate de calcium. Les plateaux du condensateur sont de forme spéciale afin de satisfaire aux hypothèses de la méthode des trajectoires identiques et de travailler sur de grandes déviations tout en évitant les effets de bord. Enfin, la maîtrise de l'ajustement des différentes pièces placées à l'intérieur de l'enceinte de verre est assurée par les choix de montage

décrits.

Il semble donc que la description du tube et du dispositif de déviation électrique n'est pas une simple description de l'instrument construit d'après les instructions de Guye et Lavanchy, mais constitue déjà une argumentation sur les qualités de l'instrument et le soin apporté dans sa réalisation.

Elle n'apparaît ainsi pas suffisante pour construire une copie fidèle du tube. Toutes les dimensions et les distances ne sont pas données. De ce point de vue, la photographie jointe au Mémoire de 1921 [fig. 4.2] n'apporte pas vraiment plus de détails. En particulier, à quelle distance de l'extrémité du tube est placé le dispositif de déviation électrique ? Quelle est la distance précise entre l'anode et la cathode ? À ces questions immédiates succède une question importante soulevée par le travail réalisé par Falk Müller sur la décharge électrique dans les gaz et son expérience de reconstruction de tubes à décharges construits au cours du XIX^{e} siècle [8] : comment sont réalisées les traversées verre/métal dans le tube de Guye et Lavanchy [9] ?

4.1.3 Observations du tube cathodique original

4.1.3.1 Conditions de l'observation

Du fait de l'insuffisance des descriptions à nous permettre de construire une copie fidèle du tube de Guye et Lavanchy, la collaboration avec le Musée d'Histoire des sciences de Genève a constitué un élément fondamental dans notre travail de réplication. En particulier, nous avons bénéficié d'une grande latitude pour observer dans les moindres détails le tube cathodique [fig. 4.3]. Cependant, la tâche s'est avérée assez complexe, pour des raisons propres à la manipulation de pièces de musée. En effet, nous avions l'accord pour observer, prendre des photos et même sortir le tube du caisson dans lequel il était conservé, mais nous ne pouvions pas le démonter. Cette limite à nos investigations tenait bien évidemment à la nécessité de préserver autant que possible l'intégrité de cette pièce originale. Les observations de son intérieur ont donc été réalisées depuis l'extérieur.

Nos premières observations ont avant tout été guidées par les questions soulevées

8. Müller (2004) montre en effet que c'est la maîtrise par les souffleurs de verre de techniques d'insertion de fils métalliques à travers les tubes en verre qui a permis aux physiciens de la seconde moitié du XIX^{e} siècle de réaliser des tubes à décharge complètement étanches. Son expérience de reconstruction de ces tubes nous apprend également la difficulté à réaliser ce type de traversée verre/métal de façon correcte.

9. D'après les descriptions précédentes, il existe 4 traversées : une pour chaque électrode, et une pour chaque plateau du condensateur.

lors de l'analyse des descriptions faites par Guye et Lavanchy. N'ayant pas à titre personnel d'expérience en soufflerie de verre ou en atelier de mécanique, elles ont été réalisées en collaboration étroite avec les personnes chargées de procéder à la construction de la copie : le souffleur de verre M. André Schweizer et le directeur de l'Atelier des assistants M. Rémy Richard. Leur expérience technique a elle aussi été mise à profit dans la réalisation des observations. Ce n'est que grace à leur expérience dans leur domaine respectif que les observations ont pu nous apporter suffisamment d'informations.

FIGURE 4.3 – Tube cathodique utilisé par Guye et Lavanchy (*Musée d'Histoire des sciences de Genève*).

4.1.3.2 L'enceinte de verre

4.1.3.2.1 Les traversées Les dimensions et la forme de l'enceinte en verre du tube ont été mesurées précisément, en collaboration avec le souffleur de verre qui allait devoir construire une copie de celle-ci.

L'observation a révélé que les traversées verre/métal au niveau du condensateur sont réalisées différemment de celles pour les électrodes. Dans le premier cas, les fils métalliques qui assurent la connexion entre les plateaux et l'alimentation électrique passent à travers une ouverture dans le verre, et l'étanchéité est assurée par la même cire que celle utilisée pour fixer l'écran à l'extrémité du tube [fig. 4.4 et 4.5]. Cette configuration se justifie effectivement par la nécessité mise en avant dans les

descriptions de pouvoir effectuer le démontage du dispositif de déviation électrique de façon simple.

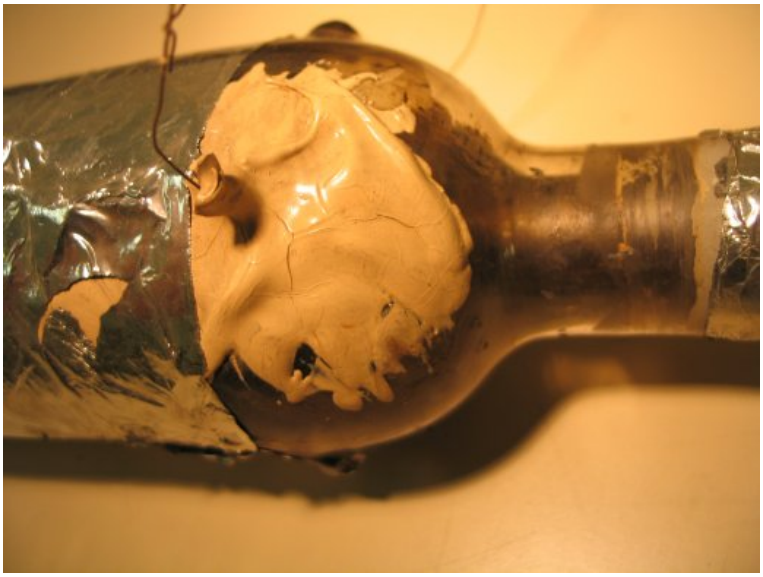

FIGURE 4.4 – Traversée au niveau du dispositif de déviation électrique.

En revanche, les traversées au niveau des électrodes sont réalisées par soudure directe entre verre et métal [fig. 4.6] [10]. D'après l'expertise du souffleur de verre, ces traversées sont très certainement réalisées par soudure de l'aluminium à un fil de platine lui-même soudé à travers le verre. En effet, la différence entre les coefficients de dilatation thermique de l'aluminium et du verre n'autorise pas une soudure aluminium/verre. Par contre, le coefficient de dilatation du platine est suffisamment proche de celui du verre pour que la soudure soit possible. De plus, cette technique était largement utilisée à l'époque, comme le soulignent S.P. Thompson en 1897 et Paul Villard [11] en 1900 :

"Ces [électrodes d'aluminium] étaient montées, *comme d'habitude*, sur des fils

10. La traversée au niveau de l'anode n'est en réalité pas visible car recouverte d'étain. Il n'y a cependant aucune trace de cire, ce qui laisse supposer qu'elle est semblable à celle au niveau de la cathode.

11. Pour des détails sur l'œuvre scientifique de Paul Villard, voir LELONG (1995), LELONG (2001), GERWARD (1999). Rappelons simplement ici que Villard (1860-1934), élu à l'Académie des Sciences de Paris en 1908, est aujourd'hui crédité de la découverte des rayons γ. Il était l'un des spécialistes français des rayonnements électriques et des rayons cathodiques en particulier. Son ouvrage *Les Rayons Cathodiques* constitue une synthèse des travaux effectués sur le rayonnement cathodique au cours de la seconde moitié du XIX^{e} siècle et une présentation de techniques expérimentales utilisées dans ce domaine précis. Guye fait référence aux recherches de Villard.

FIGURE 4.5 – Traversée au niveau du dispositif de déviation électrique - Vue intérieure.

> de platine fondus dans l'aluminium et scellés à travers les parois en verre du tube."[12]
>
> "Soit un tube de verre [...], muni à ses deux extrémités de deux électrodes métalliques (ces électrodes sont généralement constituées par un gros fil d'aluminium fixé à un fil de platine traversant la paroi du tube et soudé à celle-ci par de l'émail ou du cristal)."[13]

4.1.3.2.2 Un élément non décrit L'observation a également révélé un élément dont il n'est pas fait mention dans les articles de Guye et Lavanchy [fig. 4.7]. Il s'agit d'un petit tube de 10 cm de longueur et 3 cm de diamètre, placé sur le côté du tube cathodique.

Ce type de dispositif était à l'époque conçu pour contenir des substances dont le chauffage permettait l'émission de gaz et que le refroidissement rendait absorbantes, afin de réguler la pression dans les tubes cathodiques et les tubes à décharge. La présence d'un tel élément ne semble pas en accord avec l'affirmation de Guye et Lavanchy selon laquelle ils ont pu produire des rayons cathodiques de grande vi-

12. THOMPSON (1897, p. 471 ; nous soulignons)"These [aluminium electrodes] were mounted, *as usual*, on platinum wires, which were fused into the aluminium and sealed in through the glass wall of the tube."
13. VILLARD (1900, p. 12).

FIGURE 4.6 – Traversée verre-métal au niveau de la cathode.

FIGURE 4.7 – Photographie montrant le compartiment de verre soudé au tube cathodique.

tesse sans utiliser de charbon actif dont l'action est justement celle-ci. Nous avons néanmoins fait le choix de reconstruire ce tube afin de chercher par la suite si son utilisation était nécessaire ou non.

4.1.3.2.3 Assemblage des différentes parties de l'enceinte Comme décrit dans l'article de Guye et Lavanchy, l'enceinte de verre est constituée de trois parties : un tube contenant les électrodes, un tube contenant le dispositif de déviation électrique et l'écran qui ferme le tube à son extrémité. Du fait de l'écran électrostatique, que nous ne pouvions enlever, nous n'avons pas pu observer comment était faite la liaison entre les deux tubes. Nous avons cependant pu observer la fermeture du tube par l'écran qui est effectivement assurée par de la cire dont la couleur n'est plus tout à fait blanche mais plutôt ocre.

4.1.3.3 Les électrodes

4.1.3.3.1 La cathode La technique utilisée pour réaliser la traversée verre/métal au niveau de la cathode n'est en fait pas le seul élément que l'observation d'un spécimen original a permis d'éclaircir. La manière dont la cathode, qui dans la description se résume à un disque d'aluminium, est montée dans le tube, est également particulière [fig. 4.8].

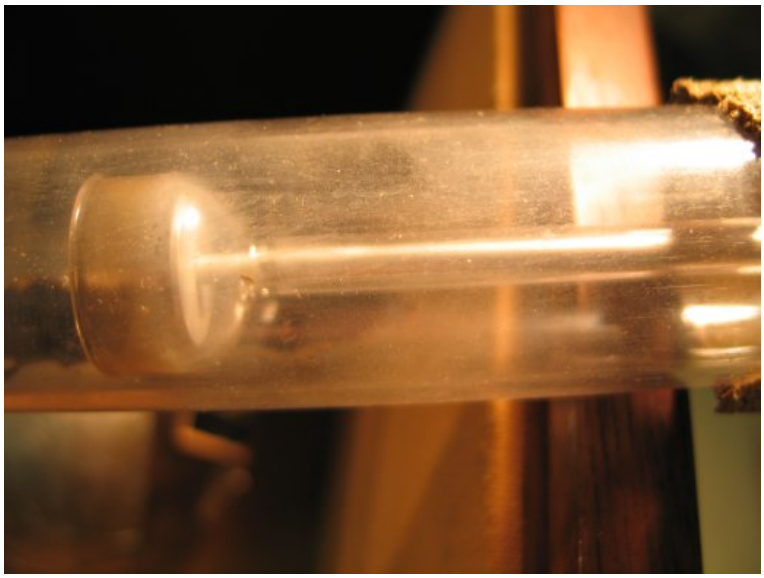

FIGURE 4.8 – La cathode et son montage dans le tube.

En effet, le disque d'aluminium est fixé à une tige également en aluminium, qui est sertie au centre de celui-ci. Cet ensemble tige-disque est placé à l'intérieur d'un long tube de verre de faible diamètre dont l'extrémité — à droite sur la fig. 4.8 — est soudée au tube, et qui se termine en une sorte de cloche à l'intérieur de laquelle se trouve le disque d'aluminium [14]. Enfin, c'est au bout de la tige qu'est serti un fil qui semble être entièrement en platine et qui traverse le verre.

4.1.3.3.2 L'anode D'après la description de Guye et Lavanchy, l'anode est un cylindre de laiton à l'intérieur duquel est placé un diaphragme circulaire de diamètre 0,2 mm. De plus, ce cylindre est fixé au cylindre *D*, support du condensateur. Là encore, l'observation permet d'en apprendre davantage sur la réalisation concrète de cette anode et son montage à l'intérieur de l'enceinte de verre.

L'observation montre que les deux cylindres, l'anode et le cylindre *D*, sont soudés à l'étain [fig. 4.9]. Quant au diaphragme, il nous est impossible de dire de quelle manière il était fixé à l'intérieur de l'anode car il n'est plus en place sur le tube conservé au Musée [fig. 4.10]. De même, nous ne pouvons pas dire avec précision quelle était sa position à l'intérieur de l'anode.

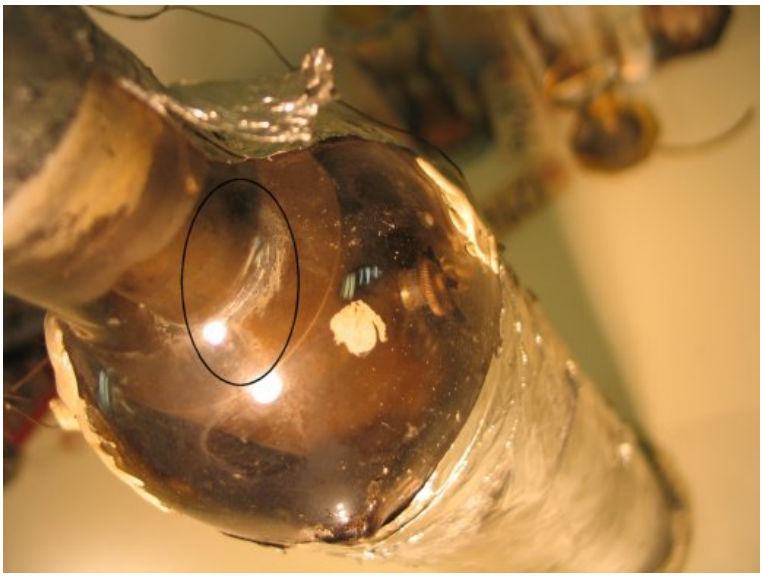

FIGURE 4.9 – Soudure entre l'anode et le cylindre *D* support du dispositif de déviation électrique.

14. Ce dispositif sert très certainement d'isolant électrique afin de prévenir toute perte de courant au niveau de la cathode par décharge latérale.

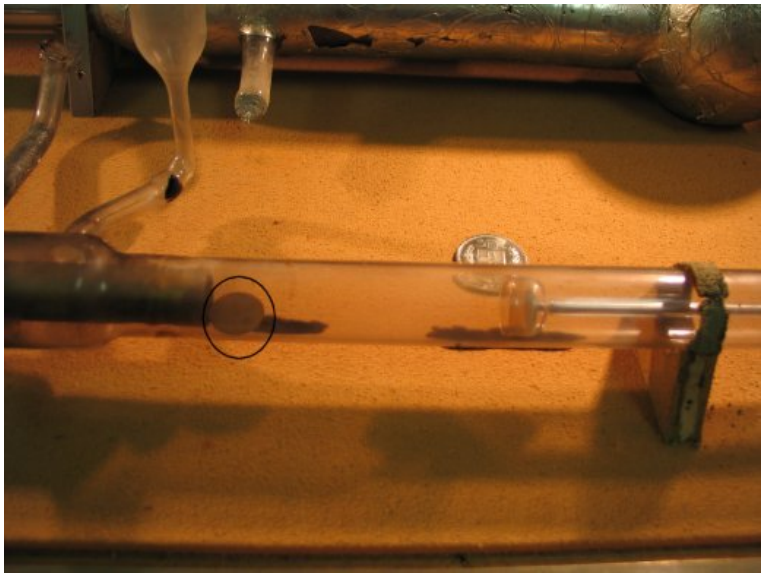

FIGURE 4.10 – Le diaphragme, sorti de sa position initiale à l'intérieur du cylindre anode

La connexion entre l'anode et la traversée verre/metal est assurée par un ressort spiral. L'observation de celui-ci n'est pas aisée du fait du papier d'étain qui recouvre le tube, mais néanmoins possible car l'écran électrostatique ne recouvre pas toute l'anode. En revanche, la connexion entre le ressort et le cylindre n'est pas visible.

Enfin, le cylindre anode est constitué de deux cylindres. L'un (a) est soudé au cylindre D, et l'autre (b) peut coulisser à l'intérieur du premier [fig. 4.11], afin d'ajuster la distance entre les électrodes pour obtenir une émission de bonne qualité.

4.1.3.4 Le dispositif de déviation électrique

A l'exception des contraintes de montage rappelées par Guye et Lavanchy, la description du dispositif de déviation électrique est très sommaire. Or, les conditions dans lesquelles nous avons pu observer le tube conservé au Musée ne nous permettaient pas de mettre à jour tous les détails de la construction de ce dispositif. Nous n'avons ainsi pas pu mesurer précisément la distance séparant les plateaux et l'écran [15].

Nous avons pu toutefois observer les fixations des plateaux à travers l'enceinte

15. Cette distance intervient dans le calcul de l'intégrale de champ électrique. Plus elle sera élevée, plus l'intégrale de champ sera élevée et ainsi, plus la déviation sera grande pour une valeur de tension donnée entre les plateaux du condensateur.

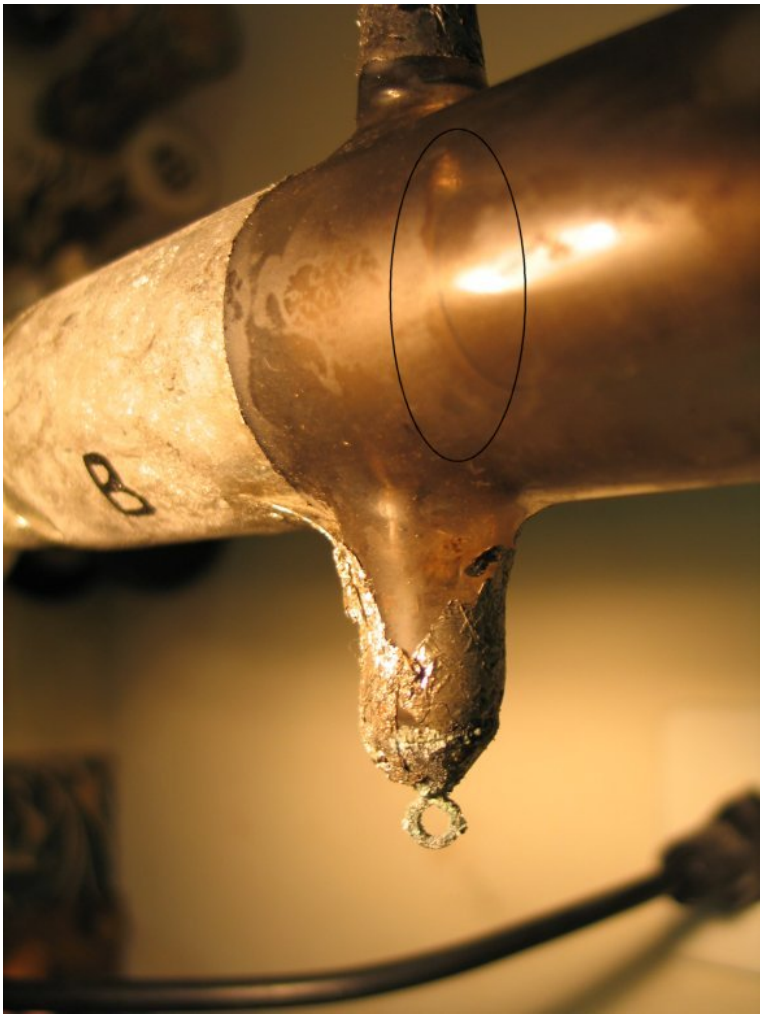

FIGURE 4.11 – L'anode est constituée de deux cylindres coulissant l'un dans l'autre.

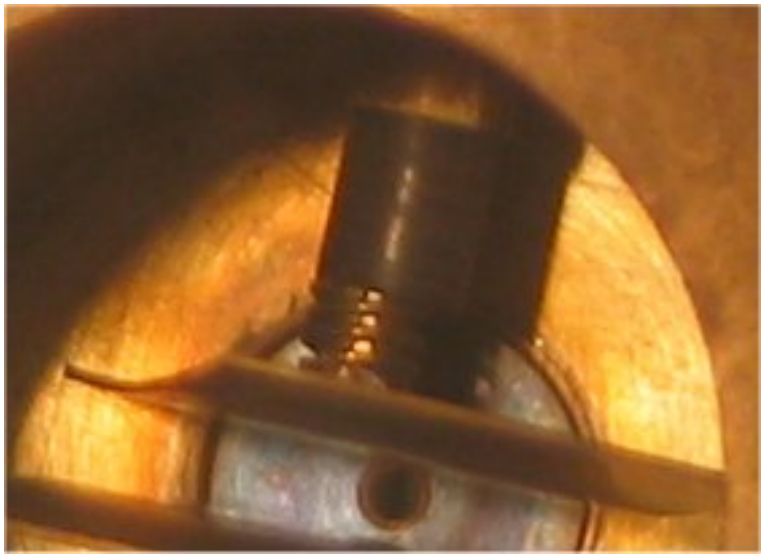

FIGURE 4.12 – Vis de réglage de la hauteur des plateaux (photographie prise depuis l'extrémité du tube à travers l'écran).

de verre car la couverture d'étain présente des trous au niveau des connexions. Il est ainsi possible d'observer à travers l'écran, non recouvert d'étain [fig. 4.13 et 4.12]. Les deux plateaux sont montés chacun sur une vis cylindrique qui traverse le cylindre *D*. Celles-ci servent à régler la hauteur des plateaux. D'après les descriptions, de l'ébonite recouvre chaque vis afin d'isoler les plateaux de la terre. Cette isolation est également visible sur les descriptions. Enfin, la connexion électrique des plateaux est assurée par un fil qui traverse le verre. Ce fil est fixé à la vis de réglage de la hauteur des plateaux par une petite vis qui permet de l'attacher ou de le détacher aisément lors du montage ou du démontage du tube.

Le cylindre *D* est lui fixé à l'intérieur du tube par de fines attaches métalliques visibles sur la fig. 4.14 qui montre également les trous dans la circonférence permettant d'insérer un tournevis afin de fixer les fils de connexion électrique des plateaux.

4.1.4 Construction d'une copie du tube cathodique original

Le travail d'observation du spécimen original conservé au Musée d'Histoire des Sciences de Genève a permis de compléter sur de nombreux points la description proposée par Guye et Lavanchy dans leur article de 1916. Mais, du fait des moyens d'observation limités des pièces situées à l'intérieur de l'enceinte du tube, des détails

FIGURE 4.13 – Vis de réglage de la hauteur des plateaux (photographie prise à travers l'enceinte de verre).

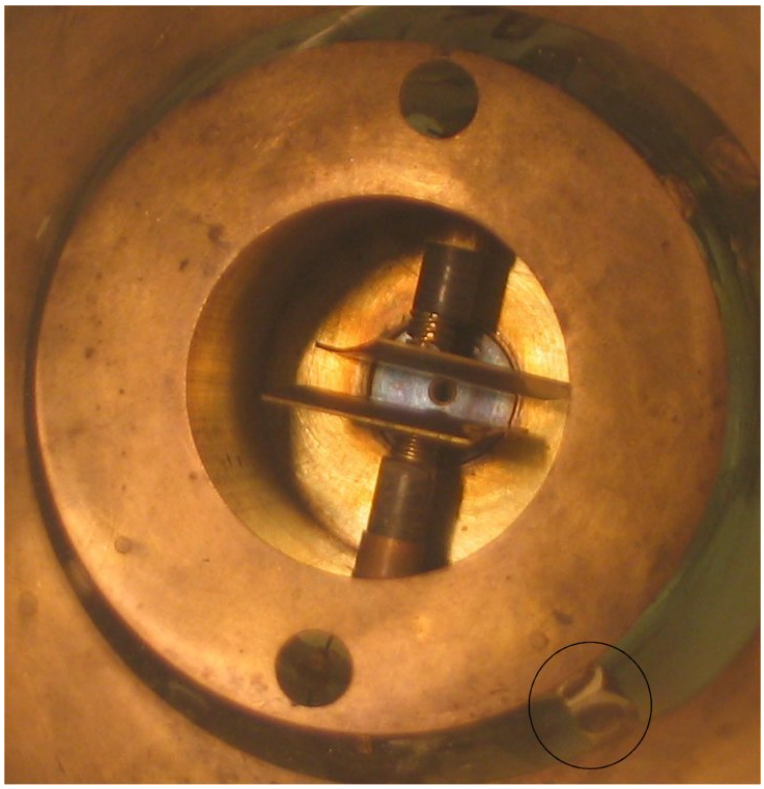

FIGURE 4.14 – Cylindre *D* photographié à travers l'écran. L'une des 4 attaches métalliques est visible en bas à droite de la photo.

de construction et de position sont demeurés inconnus. Afin de construire une copie aussi fidèle que possible de cet instrument, il nous a donc fallu penser des solutions appropriées. Et lorsque des contraintes techniques ont imposé des modifications, nous avons veillé à ce qu'elles n'entraînent pas de conséquences sur le fonctionnement attendu du tube cathodique.

4.1.4.1 Ecarts liés à des contraintes techniques

4.1.4.1.1 Composition du verre Le type exact de verre dont l'enceinte est constituée n'était pas précisé dans les descriptions et nous n'avons pu le déterminer. Nous avons donc utilisé le verre le plus couramment utilisé par la soufflerie de verre de l'Université de Genève, en ayant au préalable pris soin de s'assurer de ses propriétés diélectriques, c'est-à-dire de sa faible teneur en oxydes métalliques. En effet, en plus de permettre la bonne étanchéité de l'enceinte, le verre joue ici le rôle d'isolant électrique même pour les tensions élevées utilisés au cours de l'expérience.

4.1.4.1.2 Les traversées verre/métal Les traversées verre/métal au niveau des électrodes n'ont pas été reconstruites pour des raisons de faisabilité. En effet, réaliser une soudure entre du verre et du métal parfaitement étanche nécessite d'ajuster au plus près les coefficients de dilation thermique des matériaux, ce qui est réalisé par l'utilisation de plusieurs types de verre. Il existe désormais des traversées standardisées qu'il suffit de souder au reste de l'enceinte. Nous avons choisi cette option car, ainsi que nous le soulignons en introduction de ce chapitre, notre objectif n'était pas de construire le tube selon les méthodes utilisées dans le laboratoire de Guye, mais de construire une copie aussi fidèle que possible. Autrement dit, l'objectif de la réplication n'était pas d'étudier les techniques employées et mises en œuvre dans le laboratoire de Guye, mais d'étudier la réalisation de l'expérience. Nous avons donc consciemment introduit une différence entre le tube original et sa copie. Mais tout comme la différence entre les types de verre, elle ne crée pas de biais dans le fonctionnement du tube et la réalisation de l'expérience, puisque le rôle des traversées est de permettre la connexion électrique entre un générateur et les électrodes tout en assurant l'étanchéité parfaite de l'enceinte. Cette contrainte expérimentale était respectée pour le tube original comme elle l'est pour la copie que nous avons faite de celui-ci. Ainsi, nous avons ici privilégié la similarité d'un point de vue scientifique plutôt qu'historique[16].

16. Notons que les problèmes de construction de traversées ont été abordés par Müller (2004).

Quant aux traversées au niveau des plateaux du condensateur, nous avons procédé comme Guye et Lavanchy, avec de la cire à cacheter que l'on trouve aujourd'hui dans le commerce et du fil de cuivre de quelques dixièmes de millimètres de diamètre [17]. Cette opération a nécessité un certain savoir-faire, que nous avons acquis après de nombreux essais. En effet, la cire doit être fondue par chauffage, ce qui cause nécessairement une dilatation du fil. Lors du refroidissement, la rétractation du fil peut alors se faire en laissant un orifice dans une cire déjà solidifiée. Nous sommes parvenus à assurer une parfaite étanchéité en utilisant du fil préalablement nettoyé afin d'éliminer les impuretés à sa surface, et une grande quantité de cire que nous chauffions au contact du verre [18].

4.1.4.1.3 Montage de l'écran Lors de nos premiers essais, nous ne disposions pas encore de tungstate de calcium. Nous avons donc travaillé sans, en nous reposant sur les propriétés de fluorescence du verre sous l'impact des électrons. Il s'agissait toutefois de parvenir à fixer le disque écran en verre en bout de tube. Guye et Lavanchy ont utilisé la cire à cacheter. Afin de pouvoir procéder à des ajustements et donc à des démontages/remontages du tube de façon la plus simple et rapide possible, nous n'avons pas utilisé cette cire lors des essais préliminaires. En effet, il est apparu que nous pouvions sans trop de difficulté assurer l'étanchéité de l'enceinte de verre en utilisant de la graisse de rodage que nous déposions en couche mince sur la surface de contact entre l'écran et le tube. Cette manipulation, ainsi que le démontage, se faisait en quelques minutes seulement, ce qui n'aurait pas été possible avec la cire à cacheter.

4.1.4.1.4 La connexion entre l'anode et la traversée. Une dernière différence liée à des contraintes techniques s'est imposée lors de la construction du ressort assurant la connexion électrique entre le cylindre anode et la traversée au niveau de l'électrode positive. Nous ne connaissons pas le type de matériau utilisé sur l'original, non décrit par Guye et Lavanchy. Ce n'est certainement pas du laiton du fait

17. Pourquoi ne pas avoir à nouveau modifié les traversées ? La raison tient aux contraintes expérimentales. Nous devions pouvoir démonter et remonter aisément le tube afin d'effectuer le réglage des pièces intérieures, comme Guye et Lavanchy le soulignent d'ailleurs dans leur description.

18. Au cours de recherches menées plus tard, nous avons trouvé dans l'un des travaux menés au Laboratoire de physique de Guye en 1917 sur la construction d'un tube à rayons X une référence à une telle pratique. Dans celle-ci, l'auteur, Alex Muller, précise que l'étanchéité est assurée lorsque la cire s'écoule sur les parois du tube : "Pour avoir de bons joints, il faut chauffer les pièces jusqu'à ce que la cire commence à couler sur les surfaces" (Muller, 1917). Nous sommes effectivement parvenus à la même conclusion après avoir acquis ce savoir-faire.

de ses propriétés de déformation inadéquates dans ce cas. Afin de comprendre sur quels critères nous avons choisi le matériau à utiliser pour construire ce ressort, il est nécessaire de revenir sur le rôle joué par cette pièce.

Guye et Lavanchy précisent clairement que le dispositif de déviation électrique, solidaire du cylindre anode, doit pouvoir être retiré puis remis en place de façon simple, afin de procéder précisément aux différents réglages. La connexion entre l'anode et la traversée doit donc pouvoir se faire une fois l'ensemble cylindre D/anode introduit dans l'enceinte. Celle-ci étant constituée de deux parties, il est possible de procéder à la connexion avant l'assemblage des deux parties de verre. L'intérêt du ressort est donc de pouvoir être étiré en dehors du tube de verre contenant les électrodes afin de permettre la connexion.

Afin de répondre à cette contrainte liée au réglage et au montage du tube, il faut donc choisir un matériau conducteur qui ne sera pas détérioré par l'extension. Pour ces raisons, nous avons construit le ressort à partir d'un fil de cuivre-beryllium.

4.1.4.2 Autres solutions apportées

4.1.4.2.1 La connexion entre le ressort et l'anode Une fois résolue la question du matériau à utiliser pour construire le ressort permettant d'assurer d'une part le contact électrique entre la traversée verre/métal au niveau de l'anode et cette électrode, et d'autre part les contraintes liées au conditions dans lesquelles le montage du tube doit être effectué, il restait à réaliser la connexion entre le ressort et l'anode. L'observation ne nous a pas permis d'en voir les détails. Nous avons donc opté pour une solution simple qui permet de connecter (et de déconnecter) le ressort à l'anode aisément. Comme le montre la fig. 4.15, nous avons soudé sur le cylindre anode une pièce de laiton dans laquelle le ressort peut être vissé.

4.1.4.2.2 Le diaphragme Guye et Lavanchy ne donnent aucun détail sur le diaphragme si ce n'est le diamètre de son ouverture et le fait qu'il soit placé "à l'intérieur du cylindre anode"[19]. Sur le spécimen original, ce diaphragme n'est plus en place, ce qui ne permet pas de savoir précisément où il était placé. Cependant, ce détail permet d'affirmer qu'il n'était certainement pas soudé.

Encore une fois nous avons été guidé dans notre choix par une réflexion sur l'utilisation du tube. Si le diaphragme n'est pas soudé à l'intérieur du cylindre anode,

19. Guye et Lavanchy (1916, p. 356).

FIGURE 4.15 – La connexion électrique entre l'électrode positive et l'extérieur est assurée par un ressort soudé à une extrémité (à droite) à la traversée verre/métal, et pouvant être attaché à l'autre extrémité à une pièce de laiton spécialement conçue à cet effet.

il doit néanmoins être placé dans une position stable qui résiste au montage du tube. D'autre part, l'observation du tube depuis l'écran montre que le cylindre anode se termine par un disque ayant lui-même une ouverture circulaire en son centre. Ce détail indique que le diaphragme était certainement placé contre ce disque, à l'intérieur du cylindre anode. Il est toutefois difficile de préciser comment.

Nous avons choisi de fixer le diaphragme à l'extrémité du cylindre b coulissant à l'intérieur du cylindre fixé au support du dispositif de déviation électrique, puisque nous avions construit ce support (cylindre D) et le cylindre a en une seule pièce, afin de s'affranchir de la soudure à l'étain.

4.1.4.2.3 Les plateaux du condensateur L'observation ne nous ayant pas permis de déterminer précisément la position des plateaux du condensateur, nous avons dû le faire de façon approximative. Quant à la forme à leur donner, il nous a fallu procéder à une interprétation des arguments avancés par Guye et Lavanchy.

Ils affirment leur avoir donné une forme "cintrée" afin, d'une part, que les trajectoires des rayons déviés se rapprochent au plus près des lignes équipotentielles, et d'autre part que les effets de bord soient évités. En effet, la méthode des trajectoires identiques suppose que la valeur de la vitesse des électrons reste constante au cours

de la déviation. Ceci est assuré lorsque la déviation est magnétique car la force est alors perpendiculaire à la trajectoire en tout point. En revanche, dans le cas d'un condensateur plan, la force électrique n'est pas rigoureusement perpendiculaire à la trajectoire. C'est pourquoi Guye et Lavanchy cherchent à donner aux plateaux une forme qui assure l'orthogonalité entre les lignes de champ électrique et la trajectoire.

Il nous semble que cet argument n'est en fait pas essentiel. Le principal consiste plutôt dans la possibilité de procéder à de grandes déviations tout en évitant les effets de bord.

Nous avons néanmoins cherché à déterminer la forme que Guye et Lavanchy auraient pu donner aux plateaux s'ils avaient vraiment souhaité assurer toute sa rigueur à la méthode. Nous avons vu au chapitre 3 qu'ils utilisent souvent la technique d'approximation successive dans leurs calculs. Nous avons donc procédé de même. Dans le cas d'un condensateur plan, la résolution des équations du mouvement d'un électron, dans le cas relativiste, donne une trajectoire selon un cosinus hyperbolique. Donc, en première approximation, c'est la forme qu'il faudrait donner aux plateaux. Pour des raisons de construction, nous avons préféré une forme parabolique qui, étant donné les dimensions des plateaux, constitue une excellente approximation du cosinus hyperbolique.

4.2 Premières expérimentations ; mise en évidence d'une problématique expérimentale spécifique : la technique de production des rayons cathodiques

4.2.1 Objectifs

Une fois la copie du tube cathodique de Guye et Lavanchy réalisée, notre premier souci a été de comprendre comment l'utiliser pour produire des faisceaux d'électrons. Dans ce but, nous avons mis en place ce que nous qualifierons de *dispositif minimal* devant nous permettre de produire des faisceaux d'électrons.

Initialement, nous envisagions cette étape de la réplication comme une phase intermédiaire entre la construction d'une copie du tube cathodique et son utilisation au sein d'un dispositif copie de celui de Guye et Lavanchy. En effet, du fait des nombreux appareils utilisés, il nous semblait que nous devions essayer de séparer les difficultés liées à des savoir-faire que nous ne possédions pas. Ainsi, le *dispositif minimal* devait nous permettre d'acquérir certains savoirs et savoir-faire sur les phénomènes accompagnant l'émission cathodique dans le tube de Guye et Lavanchy. L'étape suivante serait donc de mettre à profit ces savoirs dans l'intégration à un dispositif plus proche de l'original [20].

Il est apparu très vite que cette étape allait nous confronter à une question fondamentale, aussi bien dans l'expérience de Guye et Lavanchy que dans la physique des rayonnements électriques, domaine expérimental particulièrement important au début du XX^{e} siècle.

Dans cette partie, nous décrivons comment nous avons appris, en suivant une démarche essentiellement empirique, à produire des rayons cathodiques avec le tube reconstruit. Au cours de cette phase d'apprentissage, notre perception de l'*instrument* tube cathodique et des phénomènes qui s'y déroulaient a évolué : nous avons développé un savoir expérimental en lien direct avec les phénomènes que nous apprenions peu à peu à observer puis à contrôler. Ceci nous a permis à nouveau de procéder à une relecture des descriptions de Guye et Lavanchy autour de la question de l'émission cathodique.

20. Nous reviendrons plus en détails sur l'aspect *a priori* anachronique de cette démarche au chapitre 4.2.2.3.

4.2.2 Réaliser l'émission cathodique avec la copie du tube de Guye et Lavanchy

4.2.2.1 Mise au point d'un *dispositif minimal* et premières tentatives d'utilisation du tube

4.2.2.1.1 Le dispositif minimal Comme souligné en introduction de cette partie, notre objectif premier était de faire fonctionner le tube que nous avions construit afin de comprendre les conditions de son utilisation et éventuellement de mettre en évidence des particularités dont nous n'aurions pas eu conscience initialement. Dans ce but, nous n'avons pas cherché à reconstruire immédiatement un dispositif semblable au dispositif expérimental original, mais nous avons fait le choix de travailler sur un dispositif que nous qualifions de minimal puisqu'il comprenait uniquement une pompe à vide et un générateur de tension.

Pour les raisons que nous avons données plus haut, nous avons choisi de travailler avec des appareils modernes, c'est-à-dire avec des appareils dont l'utilisation ne nécessitait pas un apprentissage trop long. En effet, notre formation de physicien n'aurait certainement pas été suffisante pour apprendre rapidement à faire fonctionner une pompe à vide ancienne ou une machine électrostatique. De plus, la reconstruction de tels appareils aurait également nécessité un temps dont nous ne disposions pas [21]. Ces deux appareils ont été empruntés respectivement au CERN [22] et à l'Ecole de physique [23].

Nous avons limité le dispositif minimal au tube, à la pompe et au générateur de tension puisque l'objectif de cette phase de notre travail était de nous concentrer sur l'émission des rayons cathodiques. L'hypothèse sous-tendant ce choix était que l'émission et la propagation des électrons se faisaient grâce à la différence de tension entre les électrodes du tube cathodique, dans un milieu de très basse pression.

4.2.2.1.2 Premières tentatives

21. Nous reviendrons plus tard sur les écarts au dispositif original introduits par ce choix et montrerons comment nous en avons tenu compte.

22. Il s'agissait d'une pompe turbo-moléculaire de marque Alcatel. Nous remercions ici MM. Dimitri Delikaris et Robert Chanut pour ce prêt et l'aide qu'ils ont bien voulu nous apporter tout au long de notre travail.

23. Il s'agissait d'un générateur de tension de marque Leybold 0-25 kV mis à notre disposition par M. Charly Bürgisser, que nous remercions ici pour ce prêt ainsi que sa disponibilité constante à chaque fois que nous avons eu besoin d'appareils divers.

Etanchéité de l'enceinte : la fin de la construction du tube Les premières manipulations sur le tube ont consisté à apprendre à réaliser le montage tout en assurant l'étanchéité de l'enceinte. Dans notre description du montage du tube [§ 4.1.4.1.3], nous avons précisé que nous avons utilisé de la graisse de rodage pour fixer l'écran au tube. Cette technique ne correspond pas au travail effectué par Guye et Lavanchy. Toutefois, elle comportait un enjeu que nous pensons transposable à la situation historique : la réalisation de l'étanchéité de l'enceinte et l'apprentissage d'une technique de manipulation adéquate. De même, obtenir l'étanchéité des traversées verre/métal au niveau du dispositif de déviation électrique a constitué en soi une phase d'apprentissage, cette fois assez proche de la situation originale.

Dès lors que nous étions confrontés à la question de l'étanchéité de l'enceinte, il nous fallait être en mesure de la contrôler. Nous avons à cet effet procédé de différentes manières pour vérifier l'absence de fuites. L'enceinte à été soumise au contrôle par un détecteur de fuite électrostatique. Cet instrument ne pouvait toutefois pas être utilisé au voisinage des traversées métalliques, aussi avons nous utilisé de l'alcool dont la viscosité permet de détecter les fuites au niveau des soudures. Enfin, nous pouvions vérifier la stabilité de la pression grâce à une jauge placée entre la pompe et le tube. La combinaison de ces différents moyens nous a permis de contrôler l'étanchéité lors de l'apprentissage de la technique de déposition de la graisse et de la cire.

Ce n'est qu'après cette étape *nécessaire* que nous avons pu passer à l'emploi du générateur de tension.

Electrification de l'enceinte. Le générateur utilisé différait fondamentalement de celui utilisé par Guye et Lavanchy. En particulier, il ne nous permettait pas de travailler avec un potentiel négatif à la cathode et nul à l'anode, puisqu'il ne pouvait produire que des potentiels positifs. Cette différence à première vue bénigne impliquait de faire particulièrement attention aux manipulations effectuées, puisque l'écran électrostatique qui recouvrait une grande surface du tube était lui porté au même potentiel que l'anode, soit jusqu'à 25 kV environ. De plus, cela créait une grande différence de potentiel entre les plateaux du condensateur et l'anode ce qui ne manquerait pas de poser problème lors de l'utilisation du dispositif électrostatique.

La première fois que nous avons branché le générateur, nous n'avons pas été en mesure d'observer un faisceau cathodique.

Les conditions dans lesquelles s'est déroulée cette première tentative étaient les

suivantes. Après avoir fait un vide de l'ordre de 10^{-4} $mm\ Hg$[24] dans le tube, une vanne était fermée afin d'isoler le tube de la pompe. La pression augmentait alors lentement du fait du dégazage au niveau des parois de verre et des surfaces métalliques. Enfin, nous réglions la tension délivrée par le générateur. Nous n'avons observé aucun effet pour des pressions inférieures à 10^{-3} mm de mercure, quelque soit la tension entre 0 et 25 kV. Pour des pressions supérieures, nous observions ce que nous qualifiions à ce moment là de *lueur* entre la cathode et l'anode, de couleur rouge/violet. Son aspect semblait dépendre de la pression.

Ces premières observations étaient instructives à plusieurs égards. En premier lieu, nous avions la confirmation de l'établissement d'une différence de potentiel entre les électrodes et du passage d'un courant électrique, puisque les phénomènes lumineux que nous observions correspondaient à l'ionisation de l'air entre les électrodes[25]. En second lieu, nous avions mis en évidence une dépendance à la pression de ces phénomènes électriques. Ces éléments indiquaient un fonctionnement du tube, placé au sein du *dispositif minimal*, qu'il nous fallait évaluer. Le fonctionnement du tube cathodique tel que nous l'envisagions correspondait-il au fonctionnement de *ce* tube cathodique ? Observions-nous les phénomènes attendus *en principe* avec ce type de dispositif ?

En d'autres termes, s'agissait-il d'un problème d'observation ou de production des rayons cathodiques ?

4.2.2.2 De l'observation de *phénomènes électriques dans l'air* à la production et à l'observation du rayonnement cathodique

4.2.2.2.1 Utilisation d'une source primaire : *Les rayons cathodiques* de Paul Villard Face aux questions soulevées par l'impossibilité dans laquelle nous étions d'observer la trace de la production d'un faisceau d'électrons, nous avons décidé de consulter un ouvrage du début du XX^e siècle sur les rayons cathodiques. Nous

24. L'unité internationale de mesure de pression est actuellement définie par le *Pascal* noté Pa. 1 Pa correspond à une force d'1 $Newton$ par m^2. La pression atmosphérique (1 atmosphère ou 1 atm) vaut 101325 Pa. Le $mm\ Hg$, ou *millimètre de mercure* est une unité plus ancienne. 1 atm vaut 760 $mmHg$. Donc, 1 mm de mercure est équivalent à environ 133 Pa ou $\frac{1}{760}$ atm. Nous exprimerons les pressions en mm de mercure, unité encore largement utilisée dans les domaines de pression auxquels nous travaillons, mais aussi à laquelle nous nous sommes habitués au cours de ce travail.

25. Sans entrer dans le détail de phénomènes complexes, disons simplement que les quelques particules chargées qui existent toujours dans le gaz contenu dans le tube sont mises en mouvement sous l'action du champ électrique présent entre les électrodes. Les phénomènes lumineux sont alors la conséquence observable à l'œil de ces chocs.

nous sommes dirigés vers l'ouvrage de Paul Villard *Les rayons cathodiques* [26]. En effet, comme nous l'avons souligné au chapitre 3, Guye et Ratnowsky font référence aux nombreux travaux expérimentaux de Villard sur le rayonnement cathodique.

L'ouvrage de Villard est organisé de la façon suivante. En premier lieu, il présente les appareils et les techniques pour maîtriser la pression et la nature du gaz contenu dans une enceinte de verre, ainsi que les appareils sources de haute tension. Il souligne dans ce premier chapitre que la connaissance de la pression dans les *tubes à gaz raréfiés* n'est pas nécessaire :

> "Une jauge de Mac Leod sera au besoin jointe à l'appareil pour permettre de mesurer la pression, mais cela n'est nullement nécessaire : les aspects présentés par les tubes raréfiés pendant leur fonctionnement dépendent en effet non seulement de la pression, mais aussi de leur forme, de leur dimension, et de la disposition des électrodes. A chaque tube correspond une échelle particulière de pression ; tel tube donnant, au cinquantième de millimètre, les mêmes effets qu'un autre dans lequel la raréfaction atteindrait le millième de millimètre. *Les conditions d'une expérience seront par suite définies beaucoup mieux par les phénomènes électriques que par la pression.*" [27]

Ce paragraphe indique que la connaissance de la phénoménologie de l'expérience prime sur des critères quantitatifs de pression. Transposé à notre démarche de réplication, ceci nous invitait fortement à continuer le travail exploratoire que nous avions entamé sur notre dispositif. En particulier, la dépendance des phénomènes observables à la pression apparaît comme primordiale.

Le second chapitre est consacré aux *phénomènes électriques dans les gaz raréfiés*. Villard y décrit précisément ce que nous avions commencé à observer. Ainsi, la *lueur* entre les électrodes correspond à la "lumière positive". Villard décrit ce phénomène comme une "colonne lumineuse rouge violacé, sorte d'étincelle d'aspect nébuleux, de la grosseur d'un crayon [qui] part de l'électrode positive [...] et se termine par un affaiblissement progressif à une petite distance de l'électrode négative [...]" [28]. Il décrit également comment la pression influence l'aspect de ce phénomène. "A un degré de vide plus avancé, [...], la lumière positive augmente de volume jusqu'à remplir la section du tube. En même temps elle laisse entre elle et la cathode un espace plus considérable" [29]. Puis, "la lumière positive disparaît peu à peu à mesure

26. Villard (1900).
27. Villard (1900, p. 8 ; nous soulignons).
28. Villard (1900, p. 12).
29. Villard (1900, p. 12).

que l'on abaisse la pression"[30].

Du côté de la cathode, une lueur bleue (dans l'air) s'accroît au fur et à mesure que la pression diminue. Villard la nomme "lumière négative", ou "gaine négative" en ce sens qu'elle forme une sorte de gaine entourant la cathode. La pression diminuant, on peut voir entre elle et la cathode un "espace relativement obscur", l'espace obscur de Hittorf[31]. Selon Villard, "[c]'est dans cet espace, et dans la gaine lumineuse qui l'enveloppe, que se produisent les rayons cathodiques".

Après la description des phénomènes lumineux observables dans un tube à gaz raréfié soumis à un champ électrique, Villard consacre le reste du chapitre à la "résistance électrique des tubes à décharges". Il précise qu'il ne faut pas entendre le terme "résistance" selon l'acception usuelle dans le cas des conducteurs ohmiques, mais plutôt comme l'expression des propriétés particulières de conduction des gaz. En effet,

> "[t]ant que la différence de potentiel entre les électrodes, le voltage si l'on veut, reste au-dessous d'une certaine valeur, variable avec la nature et la pression du gaz, la forme du tube, etc. il ne passe absolument aucun courant. Quand on atteint et dépasse le nombre de volts nécessaires à la production de la décharge, un courant passe [...]"[32]

Villard parle de valeur critique du champ électrique au dessous de laquelle le courant ne passe pas. Il précise plus loin sa dépendance à la pression :

> "La valeur critique du champ varie avec la pression ; elle est d'autant plus élevée qu'on s'approche davantage du vide absolu [...] Il résulte de ce qui précède qu'il y a lieu de définir la résistance électrique d'un tube à gaz raréfié par le nombre de volts nécessaires pour vaincre la cohésion diélectrique du gaz. Cette résistance [...] diminue d'abord avec la pression et, vers 1^{mm} de mercure passe par un minimum particulier à chaque gaz. Elle augmente ensuite indéfiniment."[33]

Cette propriété de "résistance" au passage du courant nous rappelait les observations que nous avions faites lors de notre première tentative de production des rayons cathodiques. Nous avions en effet remarqué, de manière qualitative, la dépendance des phénomènes associés au passage de la décharge électrique à la pression dans le

30. Villard (1900, p. 13).
31. Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914). C'est à lui qu'est souvent attribuée la découverte du rayonnement cathodique, suite à ses travaux sur les phénomènes se déroulant au niveau de la cathode dans un tube à décharge. On pourra consulter Müller (2004) pour de plus amples détails sur les travaux de Hittorf.
32. Villard (1900, p. 14-15).
33. Villard (1900, p. 17).

tube. En particulier, nous avions noté l'impossibilité de produire ces phénomènes à des pressions trop faibles, tout au moins dans le domaine de tension auquel nous travaillions. Ainsi, il se pouvait que la pression dans le tube ait été trop faible pour que les quelques 20 kV appliqués entre les électrodes soient suffisantes pour produire la décharge.

Les indications données par Villard sur les phénomènes électriques dans les gaz raréfiés semblaient en accord avec les premières observations réalisées avec notre dispositif. Il apparaissait également que ce domaine expérimental reposait, au moins en partie, sur des savoirs et savoir-faire empiriques. Les phénomènes observables définissent les conditions de l'expérience mieux que la pression mesurée, assure Villard. Ainsi, nous sommes retournés à l'expérimentation et l'apprentissage empirique [34].

4.2.2.2.2 Retour à notre dispositif

De nouveaux phénomènes. L'une des premières expériences que nous avons menées a été de reproduire les observations décrites par Villard sur les phénomènes lumineux associés à la décharge électrique dans de l'air. Pour nous, une façon simple d'observer l'évolution des phénomènes avec la pression était de travailler à pression décroissante. En effet, grâce à la vanne placée entre le tube et la pompe, nous pouvions régler le débit du dispositif de pompage et ainsi la vitesse de décroissance de la pression dans le tube. Il était donc possible d'observer l'influence de la pression sur ces phénomènes.

L'expérience a été réalisée comme suit. Nous avions ôté le diaphragme car nous pensions que le faisceau d'électrons, s'il était produit, pourrait ne pas passer du fait d'un mauvais alignement du tube et des électrodes. Nous commencions à des pressions de l'ordre de la dizaine de mm de mercure, avec une différence de potentiel d'environ 15 kV. Nous n'observions aucun phénomène lumineux. La pression diminuant, la lumière positive apparaissait. Le passage du courant dans le tube entraînait une chute du potentiel fourni par le générateur du fait de sa limitation en puissance à 0,35 W et en courant à 0,5 mA [35]. Pour des pressions plus faibles, l'évolution

34. Bien sûr, les phénomènes que décrit Villard, ceux que nous avons rencontrés au cours de nos expérimentations, sont connus par nombre d'historiens et de physiciens. À l'époque où nous avons réalisé ce travail, nous ne les connaissions pas encore. Notre description rend compte de ce fait que nous n'avons pas voulu passé sous silence, du fait de ses implications sur l'émergence de nos questions sur l'émission cathodique.

35. Ainsi, lorsque le courant passe, la tension maximale est limitée. Par exemple, pour 15 kV, il est impossible de débiter plus de 0,023 mA.

des phénomènes lumineux suivait les descriptions données par Villard. La lumière négative s'éloignait de la cathode, laissant un espace obscur plus grand ; la lumière positive emplissait toute la section du tube et se déplaçait vers l'anode en laissant voir le phénomène de stratification spécifique des gaz composés.

Enfin, la pression diminuant encore, le courant qui passait dans le tube diminuait, permettant à la tension appliquée aux électrodes d'augmenter, et à un moment, l'intensité de la lumière négative devenait plus forte. Du côté de l'écran, on pouvait alors observer une image bleue/verte. Pour des pressions encore plus basses, cette colonne lumineuse se resserrait pour ne former plus qu'une sorte de faisceau lumineux centré sur la cathode. Enfin, celui-ci disparaissait. Ensuite, l'image sur l'écran se décalait puis finalement disparaissait.

Interprétation. A quoi correspondaient ces phénomènes ? Nous avons rapidement fait l'hypothèse que nous tenions la preuve de l'émission cathodique. Plusieurs éléments nous semblaient en effet significatifs du passage d'un faisceau d'électrons dans l'air contenu dans le tube ainsi que de leur impact sur l'écran. Pour bien les mettre en évidence, nous avons reproduit les phénomènes de la même manière, par abaissement progressif de la pression avec une tension fixée par le générateur.

En premier lieu, l'observation d'une image sur l'écran — sans couche de substance fluorescente — correspondait en partie à ce que nous attendions initialement. La couleur était spécifique du verre que nous utilisions. La forme particulière correspondait en fait à l'ombre du dispositif de déviation électrique comme s'il était éclairé par derrière. En revanche, cette image n'était pas centrée comme elle aurait dû l'être si le tube avait été parfaitement aligné et/ou s'il n'y avait eu aucune perturbation extérieure. Autrement dit et à ceci près, nous observions exactement ce qui se devait se passer si un faisceau d'électrons produit à partir de la cathode se déplaçait parallèlement à l'axe du tube jusqu'à l'écran. Une partie du faisceau serait écrantée par les pièces métalliques alors que le reste continuerait jusqu'à l'écran de verre.

Ensuite, le faisceau lumineux entre les électrodes correspondait à la trace que nous pouvions espérer du passage des électrons dans l'air résiduel contenu dans le tube. Son resserrement vers le centre de la cathode est exactement décrit par Villard dans des expériences sur une cathode concave :

> "A mesure que la raréfaction s'élève le cône s'allonge de plus en plus et sa base se rétrécit jusqu'à se réduire presque à un point situé au sommet de la

> cathode. Le faisceau se réduit alors à un filet cylindrique avec une légère diffusion latérale. On a en réalité un faisceau légèrement divergent présentant une forte condensation au voisinage de l'axe." [36]

La disparition du faisceau lumineux avec la réduction de la pression correspond à l'augmentation de libre parcours moyen des électrons résultant de la diminution de la pression [37].

Pour nous assurer davantage que nous avions bien la trace de la production de rayons cathodiques, nous avons ensuite vérifié que ce phénomène était influencé par un champ magnétique. Nous avons placé un aimant en avant de la cathode ce qui a eu pour effet de faire apparaître sur la surface du tube, entre la cathode et l'anode, une tache de la même couleur que celle observée antérieurement sur l'écran. Nous avons pu vérifier qu'il s'agissait bien de l'influence de l'aimant en le déplaçant le long du tube, ce qui avait pour effet de déplacer cette tache, et en l'éloignant, ce qui la déplaçait également puis la faisait disparaître.

Ces critères d'identification ne sont pas en tant que tels discriminants. Mais nous attendions un phénomène précis, produit dans des conditions données et aux conséquences observables connues. En d'autres termes, nous avons procédé comme indiqué dans l'ouvrage de Villard et nous avons observé des phénomènes correspondant à la description qu'il donne des rayons cathodiques, et c'est pour ces raisons que nous avons conclu que nous étions en effet parvenus à réaliser l'émission cathodique.

Ajustements nécessaires du dispositif. Il restait cependant à comprendre certains phénomènes qui nous paraissaient surprenants : l'image sur l'écran n'était pas centrée, disparaissait subitement après quelques secondes et son intensité lumineuse semblait décroître avec la pression.

L'image sur l'écran était décalée vers le bas et vers la gauche (pour un observateur qui regarde l'écran en face). Nous envisagions deux causes possibles : l'influence d'un champ extérieur et/ou le mauvais alignement du tube et des pièces intérieures. Nous avons constaté effectivement que la cathode n'était pas parfaitement perpendiculaire à l'axe du tube, et que l'enceinte de verre n'était pas non plus parfaitement alignée. Ainsi, le faisceau qui partait perpendiculairement à la surface de la cathode ne pouvait se propager selon l'axe du tube et le centre de l'écran ne coïncidait pas avec

36. Villard (1900, p.21).

37. En des termes plus accessibles, la pression diminuant, le "nombre" de particules présentes dans le tube diminue. Ainsi, les électrons rencontrent moins d'"obstacles" sur leur trajet. Ils peuvent donc se déplacer plus longtemps sans choc.

l'axe. Avant de démonter le tube pour procéder à ces réglages, nous avons cherché les causes extérieures susceptibles de perturber la propagation du faisceau cathodique.

Nous avons commencé par placer des feuilles d'aluminium connectées à l'anode sur la surface du tube afin de réaliser l'écran électrostatique. Ceci a eu pour effet de permettre une stabilisation nette de l'image qui restait visible plus longtemps. Elle restait toutefois décalée et elle finissait quand même par disparaître.

Nous avons par la suite compris la raison de la disparition subite de l'image ombre du dispositif de déviation électrique. Ce dernier est en effet isolé électriquement de l'anode. Ainsi, lorsque les plateaux ne sont pas reliés à l'extérieur, ils constituent une surface métallique libre placée dans le tube. La disparition observée donnait l'impression d'une soudaine défocalisation du faisceau. Nous pensons que cela vient du fait que les plateaux se chargent progressivement sous l'impact des électrons. Étant électriquement isolés, les charges s'y accumulent et au bout d'un moment, le champ électrique ainsi créé devient suffisamment élevé pour perturber fortement la propagation des électrons. Nous avons donc relié ces plateaux à l'anode grâce aux fils électriques qui traversent le verre et qui serviraient par la suite à réaliser l'alimentation du dispositif de déviation électrique. Cette manipulation a résolu le problème de la disparition subite de l'image.

Ensuite, nous avons envisagé l'influence du champ magnétique terrestre. La composante horizontale aurait pour conséquence une déviation verticale. Celle-ci serait fonction de la position du tube par rapport au sens de cette composante. La composante verticale aurait pour conséquence une déviation vers la gauche, quelle que soit la position du tube dans le plan horizontal. Pouvoir isoler l'effet du champ terrestre impliquait nécessairement de vérifier au préalable l'existence éventuelle d'autres effets. Nous avons donc sondé le champ magnétique dans le voisinage du tube, mais n'avons pas trouvé d'autre influence [38]. De plus, nous avons procédé au réalignement du tube et de la cathode. A cette occasion nous avons replacé le diaphragme, puisque nous pensions maîtriser suffisamment le phénomène pour être capable de l'observer dans ces conditions. Cependant, nous avions toujours une image — un spot — décalée vers le bas et la gauche. Nous avons alors effectué les observations pour différentes positions du tube. Celles-ci ont corroboré l'hypothèse de l'influence du champ magnétique terrestre.

A ce stade, nous avions résolu presque tous les problèmes qui se posaient à nous dans notre tentative de produire un faisceau d'électrons dont nous observions

38. Nous avons pour cela utilisé une sonde de Hall.

un spot sur l'écran [39]. Le tube, les électrodes et le diaphragme étaient correctement alignés, l'écran électrostatique était en place et le spot était stable pendant un certain temps, de l'ordre d'une vingtaine de secondes, lorsque le tube était isolé du système de pompage. Ceci tenait certainement au fait que le *nettoyage* du tube n'était pas suffisant et qu'ainsi le dégazage des parois de verre et des surfaces métalliques faisait remonter la pression trop vite. Cela avait alors pour effet d'accroître l'intensité du faisceau cathodique et donc du courant débité par le générateur qui ne pouvait alors plus assurer une différence de potentiel suffisante.

Nous avons alors pensé que si l'on réalisait un vide plus poussé, ce problème de dégazage ne se poserait plus, ou en tout cas moins, et que nous parviendrions ainsi à stabiliser l'émission cathodique. Cette hypothèse fut contredite par l'expérience et nous a confronté à un problème que nous n'avions pas encore envisagé dans le détail : l'émission cathodique dans un tube cathodique sans filament chauffé.

Avant de préciser ce point, qui s'est avéré fondamental, nous proposons une première analyse du travail avec le *dispositif minimal*.

4.2.2.3 Analyse

Le premier travail expérimental que nous avons effectué avec la copie du tube de Guye et Lavanchy peut être qualifié d'exploratoire. Après la description proposée dans les deux chapitres précédents, nous souhaitons désormais proposer une analyse de ce travail en lien avec l'objectif global de réplication de l'expérience de Guye et Lavanchy.

La phase de construction du tube a été instructive pour mettre à jour le rôle argumentatif des descriptions originales proposées par Guye et Lavanchy. Elle a de plus joué le rôle de *guide* dans l'étude du tube cathodique en tant qu'instrument historique, puisque les lectures des descriptions étaient orientées par la reconstruction à accomplir.

Quelle devait-être l'étape suivante ? Fallait-il continuer la démarche de reconstruction et s'attaquer aux nombreux autres instruments qui constituaient le dispositif expérimental original, ou bien alors se concentrer sur le tube et essayer d'en comprendre le fonctionnement avant de passer au reste du dispositif ? Pour des raisons

39. Notons que l'observation du spot a nécessité de s'habituer à le *trouver*. En effet, du fait de sa petite taille l'œil devait s'habituer à l'obscurité dans laquelle nous travaillions pour *trouver* sa position sur l'écran. Nous avons noté qu'un observateur *novice* avait beaucoup plus de difficultés à le trouver.

pratiques — un travail en général et un travail de thèse en particulier sont limités dans le temps — il paraissait plus pertinent de continuer d'abord le travail entamé sur le tube avant de passer à la construction d'autres instruments. Nos intentions premières étaient en effet d'apprendre à faire fonctionner le tube copie de l'original avec un dispositif dont le contrôle ne nécessiterait pas un apprentissage trop long.

Ceci n'était cependant pas sans soulever un problème d'ordre méthodologique auquel nous avons répondu de la façon suivante.

L'une des questions les plus souvent posées à l'égard de "la pratique de reconstitution des expériences historiques"[40] concerne les éventuels problèmes d'anachronisme. Comme le résument Blondel, Dörries et Pestre dans leur introduction à l'ouvrage *Restaging Coulomb*[41], il s'agit de savoir comment "prendre en compte les risques d'anachronismes qui dérivent des multiples décisions que doit prendre l'historien lors de l'exercice de reconstitution"[42]. Or, le choix fait de poursuivre l'étude du tube cathodique de Guye et Lavanchy en dehors d'un dispositif reconstruit comme une copie de l'original d'une part, mais également de chercher à étudier cet instrument indépendamment de l'utilisation qui en était faite dans l'expérience originale, ne constitue-t-il pas un écart flagrant à l'objectif initial de reconstituer cette expérience ? En d'autres termes, dans quelle mesure le choix que nous nous apprêtions à faire risquait-il de nous entraîner sur des chemins trop éloignés de celui menant vers une reconstitution de l'expérience de Guye et Lavanchy ?

Une première réponse à ces questions importantes tient à ce qu'une démarche de réplication ne peut prétendre reconstruire la réalité des acteurs historiques. Pour évidente qu'elle soit, cette remarque se doit d'être rappelée et assimilée. En tant qu'historiens, notre objectif n'était pas de procéder du début à la fin comme l'expérimentateur historique. Il conviendrait d'ailleurs de se demander au préalable s'il s'agissait de Guye, de Lavanchy, de Guye et Lavanchy, ou encore de Guye et/ou Lavanchy et/ou un autre acteur. Quand bien même saurions-nous exactement quelle(s) personne(s) a (ont) effectivement réalisé l'expérience, nous ne serions pas non plus en droit de prétendre vouloir agir à l'identique. Car en effet, entre les acteurs historiques et les historiens en situation de reconstitution existe un fossé infranchissable tenant à la culture scientifique de chacun d'eux.

Ces remarques peuvent sembler d'une trivialité presque naïve. Elles permettent toutefois d'introduire la réflexion soulevée par les questions précédentes : c'est bien

40. Pestre (1994).
41. Blondel *et al.* (1994).
42. Blondel *et al.* (1994, p. 6).

l'historien, avec ses propres savoirs, sa propre culture et ses propres préjugés, qui essaie de reconstituer l'expérience historique, et il convient de ne pas l'oublier. Le risque envisagé par Pestre est donc bien présent :

> "Un argument pertinent et d'un très grand poids qui vient immédiatement à l'esprit est en effet celui du risque d'anachronisme inhérent à tout exercice de réplication, la *la forte probabilité de mettre surtout en scène nous-même et nos propres préjugés dans toute tentative de* rejouer aujourd'hui [43] *un acte historiquement clos*. Si l'acte de remise en scène trouve sa justification dans un espoir d'identification à des hommes et à une époque, s'il présuppose la possibilité d'une reconstitution pleine et chargée de l'identité du moment, cela ne peut que profondément inquiéter l'historien." [44]

Ainsi, le risque d'anachronisme n'est pas tant situé dans les écarts à la situation historique que dans l'oubli de son caractère situé et indépassable. Notre choix de travailler avec un dispositif que nous avons qualifié de minimal ne s'en trouve pas justifié, mais nous voyons qu'il n'était pas, *a priori*, voué à la faute historique.

Pour toutes les raisons invoquées, il semblait donc pertinent de continuer de concentrer notre attention sur le tube copie de l'original.

4.2.2.4 Améliorations du dispositif et retour sur la stabilité de l'émission

4.2.2.4.1 Construction du dispositif de compensation du champ magnétique terrestre Le travail expérimental réalisé avec le *dispositif minimal* a été instructif à de nombreux égards. Nous avons pu compléter notre connaissance de sa construction en apprenant à réaliser les traversées verre-métal au niveau du dispositif de déviation électrique avec la cire à cacheter. Une fois le tube monté, nous avons également dû nous assurer de l'étanchéité de l'enceinte,ce que nous avons appris à faire par divers moyens. Au cours des premiers essais, nous utilisions des techniques liées à la problématique expérimentale de la physique du vide — détecteur de fuite, alcool, jauge, fonctionnement de la pompe. Celles-ci ne sont pas analogues à celles utilisées par les acteurs historiques.

Par la suite, nous avons été confronté aux phénomènes associés au passage de la décharge électrique dans l'air à différentes pressions. N'étant pas familier de ce domaine expérimental, nous avons utilisé un ouvrage d'époque dans lequel sont décrits ces phénomènes que nous avons alors cherchés à reproduire. Nous avons dû réali-

43. Souligné par l'auteur.
44. Pestre (1994, p. 18 ; nous soulignons).

ser de nombreuses expérimentations afin de parvenir à une connaissance empirique suffisante de notre dispositif.

Après un certain temps, la maîtrise que nous avons acquise nous a permis d'isoler le phénomène que nous recherchions, l'émission cathodique. Pour ce faire, nous avons interprété certaines observations comme des phénomènes consécutifs à la production du rayonnement cathodique. Ce processus a nécessité de nombreuses expérimentations pour observer et isoler les différentes preuves de la production des rayons cathodiques. Le temps consacré à ces expérimentations nous a permis d'améliorer notre connaissance du dispositif et du fonctionnement du tube.

Enfin, nous avons résolu les difficultés liées au montage du tube — alignement, ajout de l'écran électrostatique et ajustement du dispositif de déviation électrique.

L'expérimentation avec le *dispositif minimal* s'est ainsi achevée d'une part par la nécessité évidente de construire un dispositif de compensation du champ magnétique terrestre dont l'influence sur le trajet des électrons avait été rendue manifeste, et d'autre part par l'impossibilité dans laquelle nous étions de produire des rayons cathodiques pendant une durée suffisante. Nous nous sommes tout d'abord attaché au premier point car nous pensions que cela pouvait avoir une influence sur le second. En effet, d'après Villard, le faisceau cathodique se resserrait au centre de la cathode lorsque la pression diminuait. Or, si le faisceau ne se propage pas en ligne droite du fait du champ magnétique terrestre, le diaphragme constitue un obstacle. Il nous fallait éviter cela.

Le dispositif de compensation n'est pas décrit précisément dans l'article de Guye et Lavanchy, qui font référence au travail précédent de Guye et Ratnowsky [45]. Dans celui-ci, un schéma de la table d'expérience [fig. 4.17] montre qu'elle est placée à l'intérieur d'un ensemble de cadres le long desquels sont attachés des fils électriques. La description est un peu plus explicite. La fonction de ces cadres est de réaliser un champ magnétique opposé au champ magnétique terrestre le plus uniforme possible le long de la trajectoire des électrons. Le dispositif est donc constitué de deux paires de grandes bobines magnétiques qui annulent respectivement la composante horizontale et verticale du champ terrestre. La photographie jointe au Mémoire rédigé par Guye en 1921 nous donne une idée de la taille réelle de ces cadres [fig. 4.16]. Cependant, leur dimension, le nombre d'enroulements et l'intensité du courant électrique ne sont précisés dans aucune publication.

45. Lavanchy (1917, p. 23) : "Comme nous avons utilisé à cet effet le dispositif même dont se sont servis MM. C. E. Guye et S. Ratnowsky, nous nous dispensons d'y revenir en détail.".

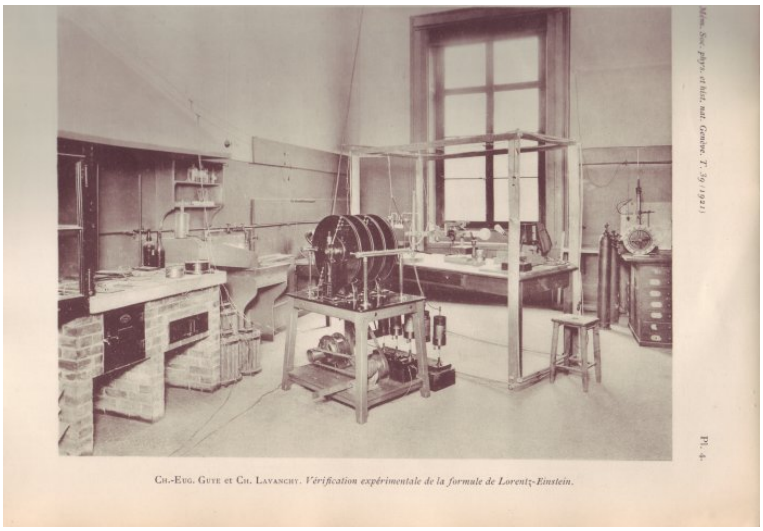

FIGURE 4.16 – Dispositif expérimental de Guye et Lavanchy. La photographie est annexée au Mémoire de 1921. GUYE (1921)

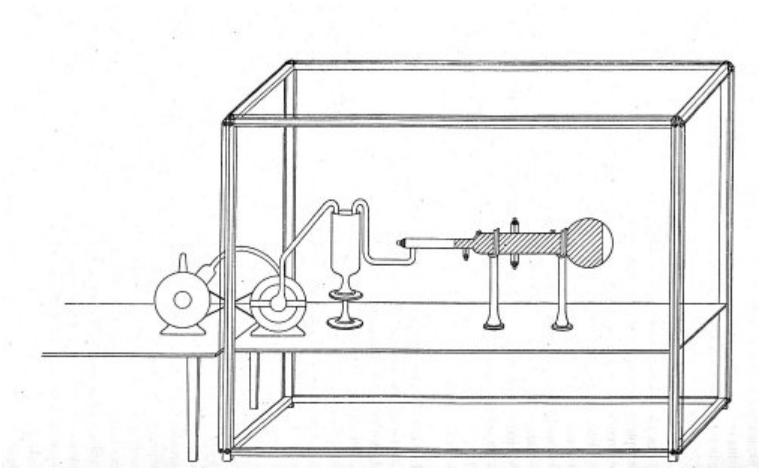

FIGURE 4.17 – Schéma de la table d'expérience dans l'expérience de Guye et Ratnowsky GUYE et RATNOWSKY (1911)

Là encore, nous avons été guidés par les contraintes liées au dispositif dans son ensemble et par l'objectif recherché dans la construction de ces cadres compensateurs. Il fallait créer un champ magnétique le plus uniforme possible tout au long de la trajectoire des rayons cathodiques, ce qui imposait d'adopter un dispositif de Helmholtz placé autour de la table d'expérience. Ce choix correspondait aux photographies publiées dans le mémoire de 1921. D'autre part, les alimentations que nous pouvions utiliser pour produire le courant circulant dans les enroulements de fils étaient limitées à 5 *A*. Ceci imposait un nombre d'enroulements minimal autour de chaque paire de cadres.

La compensation de chacune des composantes du champ magnétique terrestre a été mise en œuvre de deux façons différentes. Pour la composante horizontale, nous avons commencé par utiliser une boussole, ainsi que Guye et Ratnowsky l'écrivent :

> "Pour s'assurer de la compensation, on plaçait d'abord une aiguille aimantée dans le voisinage immédiat du tube cathodique, et l'on réglait le courant dans les cadres jusqu'à ce que l'aiguille restât en équilibre indifférent." [46]

Ceci nous permettait de vérifier que les calculs effectués était corrects et, avant tout, nous donnait une première valeur *approchée* [47] de la valeur de l'intensité du courant à utiliser pour réaliser la compensation de la composante horizontale du champ magnétique terrestre.

Pour rendre plus précise cette détermination, et afin de pouvoir réaliser également la compensation de la composante verticale, nous nous sommes inspiré de Guye et Ratnowsky :

> "On pouvait ensuite procéder à un réglage plus exact encore par l'observation même des rayons cathodiques.
>
> Dans ce but, on faisait varier progressivement le courant dans les cadres jusqu'à ce que le rayon cathodique ne soit plus étalé en un spectre, quelles que soient les variations produites dans le potentiel de décharge ; c'est-à-dire quelle que soit la vitesse des rayons cathodiques ; lorsque le réglage est atteint, la position de la tache fluorescente sur le fonds [sic] du tube devient indifférente à ces variations et n'éprouve presque plus aucun déplacement." [48]

Du fait des difficultés dans la maîtrise de l'émission cathodique, nous n'avons pas pu effectuer ces réglages dans toute leur précision. Cette démarche a néanmoins par-

46. Guye et Ratnowsky (1911, p. 312).
47. En effet, la sensibilité de la boussole était insuffisante pour permettre une détermination précise de cette valeur.
48. Guye et Ratnowsky (1911, p. 312).

ticipé à notre apprentissage du contrôle du tube cathodique puisque de cette façon, nous sommes parvenus à déterminer approximativement les valeurs des intensités de compensation.

Enfin, ce travail nous a montré que la stabilité de l'émission n'était pas améliorée par l'annulation de l'action indésirable du champ magnétique terrestre sur le faisceau cathodique.

4.2.2.4.2 Stabilité de l'émission Nous avons vu que les difficultés rencontrées pour stabiliser l'émission cathodique, et donc allonger la durée d'observation possible du spot sur lequel il allait par la suite nous falloir effectuer des mesures, étaient liées à l'instabilité de la pression dans le tube isolé du groupe de pompage. Nous avons tenté de résoudre ce problème en travaillant à des pressions plus faibles en pompant le tube pendant plus longtemps. En effet, jusqu'alors, nous avions pu observer l'émission cathodique comme conséquence de la dépendance du phénomène de décharge électrique aux conditions de pression dans le tube à décharge. Au fur et à mesure, nous procédions plus rapidement et nous devenions capables de *trouver* les conditions de l'émission sans repasser par les étapes précédentes. Nous ne nous étions pas encore posé la question de l'émission cathodique indépendamment de la décharge électrique. Autrement dit, nous envisagions encore le tube comme un tube à décharge, et non comme un tube cathodique.

Nous souhaitions désormais nous concentrer uniquement sur l'émission cathodique. Le problème de la remontée de pression nous invitait à travailler à des pressions plus basses. Nous avons donc procédé au pompage du tube jusqu'à des niveaux auxquels nous n'avions pas encore travaillé.

Il nous a été impossible d'observer une quelconque trace de l'émission cathodique.

Malgré ce que nous avions appris jusque là, cette constatation nous a interpellé. Lors de nos premières observations sur le faisceau créé dans le cadre de la décharge électrique, nous avions remarqué que lorsque la pression diminuait, l'intensité de l'image décroissait. Mais comme nous avions d'autres problèmes qui parasitaient les observations, nous ne savions pas si nous pouvions relier la diminution de pression à celle de l'intensité. Nous avions envisagé l'hypothèse selon laquelle quand la pression diminuait il fallait augmenter la tension entre les électrodes pour *retrouver* l'émission. Mais nous ne pouvions alors pas trancher quant à la validité de cette hypothèse. Ce n'est qu'avec une maîtrise plus grande du dispositif que nous avons pu la confirmer.

Ce fait établi, nous avons cherché une explication. La pression jouait-elle sur

l'émission ou alors sur l'observation de l'impact des électrons sur l'écran ? Nous avions noté au cours des différentes expérimentations un autre élément caractéristique de la présence de l'émission cathodique. Les parois du tube entre la cathode et l'anode prenaient une teinte verte [49] quand le faisceau lumineux qui semblait partir de la cathode était visible. L'observation de cette lueur verte, comme du faisceau, était clairement liée à la pression. Aussi pouvions-nous penser que l'observation de l'impact des électrons sur l'écran dépendait également de la pression. Nous avons observé que, si dépendance il y avait, elle n'était cependant pas du même ordre : lorsque les phénomènes lumineux observés entre les électrodes disparaissaient, le spot sur l'écran persistait encore pendant quelques secondes.

Ne pas avoir d'explication a priori à ces observations nous a conduit à faire une pause dans la démarche strictement empirique que nous avions choisie de suivre. Nous n'avions plus de guide et, de plus, les faits observés ne prenaient pas place dans notre conception de l'émission cathodique.

Nous arrêtons là la description de notre démarche expérimentale d'investigation, puisqu'arrivés à ce stade, nous sommes retournés à l'étude des textes historiques d'une part, scientifiques actuels d'autre part. A ce stade de la reconstitution de l'expérience de Guye et Lavanchy, le dispositif que nous avions construit était constitué du tube cathodique posé sur une table et aligné selon la composante horizontale du champ magnétique terrestre, du dispositif de compensation du champ magnétique terrestre alimenté par deux générateurs de courant [50], de la pompe à vide et de l'alimentation haute tension 25 kV [51].

49. Historiquement, l'observation de cette lueur a joué un rôle fondamental dans la mise en évidence du phénomène de rayonnement cathodique.

50. Ces deux générateurs étaient modernes. À nouveau, notre objectif étant encore à ce stade de comprendre comment réaliser l'émission, travailler avec des sources de courant similaires ou identiques à celles utilisées par Guye et Lavanchy ne constituait pas une priorité.

51. C'est à ce moment que nous avons cherché à remplacer cette alimentation. En effet, il nous fallait à terme pouvoir accélérer les électrons jusqu'à des tensions de l'ordre de 80 kV. De plus, des essais de déviation électrique du faisceau avaient montré que le fait que l'anode soit placée à un potentiel élevé perturbait le champ entre les plateaux. Cet effet ne pouvait qu'être amplifié par des tensions bien supérieures. Il nous fallait donc trouver une alimentation négative, c'est-à-dire une alimentation qui nous permettrait d'alimenter le tube en $-V$ / 0.

4.2.3 Transposer la technique expérimentale originale de production des rayons cathodiques à notre dispositif

4.2.3.1 Régler le dispositif selon Guye et Lavanchy

Les expérimentations menées avec la copie du tube de Guye et Lavanchy au sein du *dispositif minimal* ont constitué la première phase expérimentale du travail de reconstitution de l'expérience. La démarche adoptée au cours de ce travail peut être qualifiée d'expérimentation exploratoire. Guidé par les descriptions de Villard sur les phénomènes lumineux associés au passage de l'électricité dans les gaz à basse pression, nous avons appris à les observer, les produire et les reproduire. Puis nous avons identifié quelques uns d'entre eux comme significatifs de l'émission cathodique. Alors, nous avons mis en évidence certaines difficultés à réaliser cette émission : avec notre dispositif, l'émission dépend de la pression dans le tube.

Malgré ce que nous avions appris chez Villard — les phénomènes lumineux associés à la décharge électrique dépendent de la pression — les conclusions auxquelles nous sommes parvenu quant à l'émission cathodique nous surprenaient. Nous avons donc cherché à trouver des explications aux phénomènes que nous avions observés et à l'émission cathodique : celle-ci est provoquée et entretenue grâce aux particules contenues dans le tube ; il n'y a pas de source indépendante d'électrons [52].

L'évidence rétrospective de l'énoncé précédent nous engageait à comprendre les raisons pour lesquelles nous étions littéralement passé à côté. L'erreur que nous avons commise peut être résumée en quelques mots : avant d'accélérer des électrons, il faut être en mesure de les produire. Or, c'est bien la production des électrons qui a constitué pour nous la difficulté.

Comme souligné précédemment [§ 4.2.2.3], le risque premier encouru par l'historien en situation de reconstitution d'une expérience historique est de se mettre en scène lui-même, d'avoir l'illusion de s'identifier aux acteurs historiques, de projeter et confondre ses préoccupations avec les leurs. C'est afin d'éviter cet écueil fatal à l'analyse historique que Peter Heering suggère comme partie intégrante de la méthode de réplication une phase de "remise en contexte" [53]. Par "remise en contexte", il faut entendre le travail effectué par l'historien pour comprendre si ce qu'il a appris au cours de la reconstruction et de l'expérimentation était envisagé par les acteurs

52. Nous ne rentrons pas dans le détail des explications de phénomènes complexes. Une première approche synthétique est rappelée par MEI JIANG (1992, § I.2 et I.3).

53. "*recontextualisation*" ; voir par exemple HEERING (2005).

historiques ou pas, et pour quelles raisons. Bien sûr, cette analyse, cette prise de distance vis-à-vis de ses propres manipulations et du dispositif reconstruit se fait tout au long du travail de reconstitution. Ce type de réflexion a par exemple participé au choix de reconstruire le tube cathodique, puisqu'il s'agissait d'un instrument spécialement conçu pour l'expérience ; choisir d'utiliser un tube acheté dans le commerce ou un tube qui aurait servi à une autre occasion aurait constitué un anachronisme injustifiable.

Dans le cas présent, face à ce que nous avons appelé nos *difficultés*, il s'agissait de comprendre comment Guye et Lavanchy traitaient la question de l'émission cathodique. Était-ce un point qu'ils soulignaient ? Comment était-il abordé ?

Dans l'article de 1916, ils écrivent au sujet de l'émission cathodique :

> "On sait d'autre part la difficulté que l'on éprouve à obtenir un bon fonctionnement des tubes cathodiques dès qu'il s'agit de produire des rayons de grande vitesse."[54]

L'émission de "*rayons de grande vitesse*" apparaît donc comme une "*difficulté*" connue, que l'"*on sait*". Les difficultés que *nous* avons rencontrées permettent de mettre en relief ces remarques de Guye et Lavanchy, qui n'avaient lors des premières lectures pas réellement pris sens. Même si, comme nous avions travaillé à des tensions inférieures à 20 kV, nous ne pouvions toujours pas comprendre profondément en quoi consistaient les difficultés à produire des rayons de grande vitesse, nous tenions là un point potentiellement instructif quant à la réalisation historique de l'expérience.

La relecture de l'article de 1916, mais également de celui de 1911 avec Ratnowsky, a de plus montré que la problématique expérimentale de la dépendance à la pression de la production des rayons cathodiques est en fait abordée plus ou moins explicitement par Guye et ses étudiants.

Les quelques lignes suivantes sont instructives :

> "Les tubes cathodiques employés ne commencent à s'illuminer d'une lueur verte qu'au voisinage de 6000 volts ; [...] C'est seulement pour une plus grande raréfaction, lorsque le potentiel de décharge atteignait 8000 à 9000 volts qu'on percevait une tache lumineuse circulaire nettement délimitée [...] Dans le cas où la raréfaction était poussée à ses dernières limites, nous n'avons pas mesuré le potentiel de décharge. On pouvait l'estimer approximativement entre 70.000 et 80.000 volts."[55]

54. Guye et Lavanchy (1916, p. 353).
55. Guye et Ratnowsky (1911, p. 305).

Guye et Ratnowsky écrivent ici sur les conditions de l'expérience. Il apparaît très clairement que, pour eux, le fonctionnement du tube cathodique et en particulier la tension sous laquelle sont accélérés les électrons est en lien direct avec la pression. Ils parlent d'ailleurs du potentiel de *décharge*, et non du potentiel d'accélération des électrons : les rayons cathodiques sont produits dans un régime particulier de la décharge électrique [56].

Au sujet de la recherche des conditions optimales pour l'émission cathodique, Guye et Lavanchy écrivent :

> "Nous avons remarqué très nettement, quoique d'une façon qualitative seulement, au cours de nos recherches préliminaires, la relation existant entre la distance cathode-anode et le degré de vide nécessaire à l'émission d'un faisceau cathodique de vitesse déterminée." [57]

À nouveau, le lien entre l'émission et les conditions de pression est souligné. Mais cette fois, nous apprenons que la distance entre les électrodes a été choisie en prenant ce lien en compte :

> "Ce sont en partie ces considérations qui nous ont amenés à adopter plusieurs des dimensions de notre tube. Nous avons ainsi, sans qu'il soit nécessaire de faire usage d'air liquide ni de charbon, et sans l'intervention d'éclairage ultraviolet obtenu des rayons de très grande vitesse." [58]

Ainsi, les conditions de l'émission cathodique telle que mise en œuvre dans leur expérience ont été explorées par Guye et Lavanchy au cours d'essais préliminaires, puis exploitées dans la construction du tube cathodique.

En note à la citation précédente, Guye et Lavanchy remarquent que " soit M. Proctor, soit M. Hupka n'ont obtenu leurs grandes vitesses qu'en éclairant la cathode avec un faisceau de lumière ultraviolette" [59]. De même, Guye et Ratnowsky remarquent à propos du travail de Hupka que l'émission était "facilitée par le phénomène de Hertz" [60], et que, dans le leur, des mesures ont été réalisées jusqu'à la moitié

56. En ce qui concerne l'émission cathodique, le tube de Guye et Ratnowsky fonctionnait de la même manière que celui utilisé dans la seconde expérience : il n'y avait pas de source indépendante d'électrons.

57. Guye et Lavanchy (1916, p. 357).

58. Guye et Lavanchy (1916, p. 357).

59. Guye et Lavanchy (1916, p. 357 ; note 2). Notons que Guye fait une erreur puisque Proctor, après avoir tenté de produire les rayons par effet photoélectrique sans succès, utilise une cathode de Wehnelt, c'est-à-dire met à profit l'effet thermionique.

60. Guye et Ratnowsky (1911, p. 294). Le "phénomène de Hertz" était l'appellation parfois utilisée pour faire référence à l'effet photoélectrique, mis en évidence par Hertz en 1888.

de la vitesse de lumière, "*et cela sans l'intervention de la lumière ultraviolette*"[61].

Ces différentes remarques ne peuvent que nous interpeller, puisque, aussi bien avec Ratnowsky qu'avec Lavanchy, Guye met en avant les conditions dans lesquelles l'émission cathodique est réalisée en insistant particulièrement sur la non-utilisation de lumière ultraviolette, qui pourtant la "facilite". Que penser de cette attitude ? Cette question est à l'origine de l'étude que nous avons menée sur les travaux contemporains à ceux de Guye pour comprendre comment était envisagée la production des rayons cathodiques au début du XX^{me} siècle [§ 5].

4.2.3.2 Contrôler l'émission avec notre dispositif

Revenons tout d'abord à notre expérimentation. Nous avons arrêté la description de notre travail à la mise en évidence du lien entre la tension et la pression pour produire des rayons cathodiques. Après avoir relu les textes de Guye et de ses étudiants, et avoir cherché à comprendre la physique du phénomène, nous sommes retournés au dispositif dans lequel nous avions pu remplacer l'alimentation 25 kV par une alimentation - 100 kV[62]. Ceci nous a permis de produire des rayons cathodiques sous des tensions plus élevées[63] et ainsi de poursuivre les recherches sur la dépendance de l'émission avec la pression. De plus, nous pouvions avec cette alimentation travailler avec des potentiels négatifs. Nous résolvions ainsi le problème du potentiel de l'anode et de l'écran électrostatique.

Avec la nouvelle alimentation, insérée dans le dispositif comprenant en plus le tube, la pompe et le système de compensation du champ magnétique terrestre, une seconde phase d'expérimentation exploratoire a pu commencer. Les notions acquises auparavant sur le lien entre pression, tension et émission cathodique ont donc pu être approfondies.

Le mode d'expérimentation suivi a été guidé par les remarques de Guye et La-

61. Guye et Ratnowsky (1911, p. 307 ; nous soulignons).

62. Cette alimentation a été prêtée par le CERN. Nous remercions M. Richard Scrivens pour la mise à disposition de cette alimentation et son aide pour l'insérer au dispositif.

63. Comme nous l'avons dit, avec l'alimentation utilisée jusqu'alors, nous travaillions à des tensions inférieures à 20 kV. Des mesures réalisées au compteur Geiger avaient montré que l'émission de rayons X, causée par l'impact des électrons sur les parois du verre et les parties métalliques à l'intérieur de l'enceinte, était très faible, voire négligeable, en dessous de 15 kV. Dès lors que nous allions travailler à des tensions supérieures, il nous fallait mettre en œuvre une protection contre ces radiations. Nous avons donc enroulé le tube au niveau de l'anode avec du plomb, placé des plaques de plomb de quelques millimètres d'épaisseur autour de la table, dont une d'1 *cm* d'épaisseur du côté de l'écran où nous passions le plus de temps pour observer le spot. La fiabilité de cette protection a été mesurée au compteur Geiger également.

vanchy sur l'utilisation de la machine électrostatique et de la pompe à vide.

> "Nous y sommes parvenus [à obtenir un bon fonctionnement du tube cathodique] en règlant [sic] le degré de vide dans le tube, en même temps que la tension et le débit à la cathode. Nous utilisions la machine statique de la façon suivante : une fois le degré de vide obtenu dans le tube, nous interrompions le fonctionnement de la pompe ; puis le débit et la tension étaient réglés au moyen d'un système de balais B dont on pouvait faire varier le nombre et l'écartement. Ces balais fonctionnent en effet à la façon d'un circuit dérivé et permettent d'obtenir par leur réglage tel débit ou telle tension que l'on désire au tube cathodique. Pour chaque vitesse cathodique, nous sommes arrivés, par des tâtonnements souvent très longs, à régler le degré de vide dans le tube, la vitesse de rotation de la machine, et enfin l'écartement et le nombre des balais qui donnaient à l'émission son maximum de stabilité."[64]

Cette description du mode opératoire suivi par Guye et Lavanchy est assez précise. L'objectif est de réaliser une émission stable de rayons cathodiques de vitesse déterminée, ce à quoi fait référence l'expression *bon fonctionnement du tube*.

Le premier paramètre à régler est la pression. Si elle diminue, l'émission ne peut être entretenue sans augmenter la tension entre les électrodes et donc la vitesse des rayons. C'est la raison pour laquelle Guye et Lavanchy interrompent le fonctionnement de la pompe. Mais il s'agit alors de s'assurer que la pression dans le tube fermé ne remonte pas trop rapidement. Si c'est le cas, le débit à la cathode augmente ce qui pose problème dans le maintien de la différence de potentiel entre les électrodes.

Ensuite, Guye et Lavanchy règlent le fonctionnement de la machine électrostatique. Pour comprendre en quoi ce réglage est nécessaire, il faut s'intéresser au fonctionnement du tube cathodique et au système d'alimentation de ses électrodes.

Une machine électrostatique est avant tout un générateur de courant, c'est-à-dire un appareil délivrant un courant constant dans un domaine de tension donné. De façon générale, il est possible de simuler un générateur de tension à partir d'un générateur de courant en branchant en parallèle un condensateur. Dans le cas des machines électrostatiques, elles étaient usuellement employées avec des bouteilles de Leyde qui jouaient alors le rôle de condensateur haute tension, c'est-à-dire d'un réservoir de charge. Bien que leur utilisation ne soit pas précisée, il semble raisonnable de supposer que leur machine en était équipée, comme le montre d'ailleurs la photographie du dispositif reconstitué dans le Mémoire de 1921 [fig. 4.16].

64. Guye et Lavanchy (1916, p. 353-355).

Le principe du réglage de la machine électrostatique est le suivant. Si le tube ne conduit pas le courant — ce qui revient à ouvrir le circuit après les bouteilles de Leyde — la tension entre les pôles de la machine augmente selon son débit. Elle n'augmente cependant pas indéfiniment, mais est limitée par les pertes de charges dans la machine elle-même, au niveau des pôles par effluve, ou encore l'utilisateur peut la limiter grâce à un éclateur placé sur les pôles[65]. Le réglage de la vitesse de rotation de la machine constitue un réglage de la vitesse à laquelle sont collectées les charges. Le réglage des balais permet de régler la quantité de charges collectée à chaque tour. Ainsi, il est possible de régler le fonctionnement de la machine de sorte que le bilan des charges débitées à la cathode, collectées par la machine et perdues dans l'ensemble du dispositif soit nul à partir d'une certaine tension qui sera alors constante. Le débit à la cathode dépendant de cette tension, il s'agit également d'opérer dans un régime de fonctionnement du tube le plus adéquat possible, et donc, en particulier de travailler à pression constante.

Cette phase de réglage est donc cruciale dans l'expérience de Guye et Lavanchy, et repose sur une connaissance poussée du fonctionnement de la machine et des tubes à décharge.

Cette façon de procéder ne devait d'ailleurs pas être très usuelle du fait des difficultés de manipulations évoquées par Guye et Lavanchy. Par exemple, au cours de recherches menées entre 1917 et 1919, un étudiant du laboratoire de Guye, Alex Muller, a procédé, avec la même machine électrostatique et la même pompe à vide, de façon très différente pour stabiliser l'émission cathodique dans un tube à rayons X. Il s'exprime ainsi :

> "Pour assurer la constance du potentiel aux bornes du tube, j'ai employé le procédé suivant, d'ailleurs bien connu. En introduisant continuellement une petite quantité d'air dans le tube, et en réglant en même temps la vitesse de rotation de la pompe, le vide, et par conséquent la résistance électrique du tube sont maintenus à une valeur voulue, et les variations du potentiel peuvent être ainsi compensées[66]. Cette méthode de réglage a permis de tenir ces variations au-dessous de 1-2 % ."[67]

65. Il s'agit simplement de boules conductrices fixées à chacun des pôles, et dont l'utilisateur peut faire varier l'écartement. Pour une distance donnée, une étincelle passera entre les boules pour une différence de potentiel qui dépend de la pression, de l'humidité, de la température, de la nature du gaz... Dans l'air, le champ électrique disruptif est de 30000 $V.cm^{-1}$.

66. On trouve souvent des remarques sur le problème suivant. Dans les tubes cathodiques du type de celui de Guye, la pression diminue lorsque le faisceau passe dans le tube. La "dureté" du tube augmente. Ce phénomène ne nous est apparu que lors des dernières manipulations. .

67. Muller (1919, p. 4).

Une telle variation du potentiel n'est pas admissible dans l'expérience de Guye et Lavanchy. Ceci souligne l'importance de cette phase de réglage de la machine électrostatique, mais également toute sa complexité puisque des méthodes différentes semblent être plus largement utilisées [68].

Avec notre dispositif, nous ne pouvions bien sûr pas effectuer ce réglage. Avec l'alimentation dont nous disposions, le débit à la cathode pouvait atteindre 1 mA sans que cela n'influe sur la tension fournie. C'est précisément ce qui, chez Guye et Lavanchy, posait problème. Cette partie de l'expérimentation originale demeurait donc inaccessible tant que nous travaillions avec ce générateur.

En revanche, nous pouvions arrêter la pompe [69] pour trouver le potentiel de décharge adéquat. Nous avons constaté que se posait alors le problème de la stabilité de la pression dans le tube. Ainsi, lorsque le tube était fermé, nous cherchions la plus petite tension sous laquelle il était possible d'observer le spot sur l'écran. Si l'on ne touchait plus à rien, ce que nous aurions à faire lors des mesures, l'intensité lumineuse au départ assez faible croissait de plus en plus vite. De même, puisque l'intensité lumineuse est fonction du nombre d'électrons qui arrivent sur l'écran, l'intensité débitée par le générateur augmentait jusqu'à atteindre la limite de 1 mA.

Avec la machine électrostatique utilisée par Guye et Lavanchy, le débit maximal était de 0,5 mA environ [70]. Ainsi, le problème de limite dans l'augmentation du débit de l'alimentation se posait également dans l'expérience originale.

Des mesures de pressions ont montré très nettement que lorsque nous fermions le tube, la pression avait naturellement tendance à remonter, mais également que l'émission contribuait à cette augmentation. En effet, le bombardement de la cathode par les ions positifs, et de l'anode par les électrons, entraînent la libération des gaz occlus dans les électrodes. Ainsi, le problème qui se posait était d'améliorer la *qualité* du vide. Ceci pouvait être en partie réalisé par un meilleur nettoyage de l'enceinte et des pièces placées à l'intérieur, ce qui limiterait le phénomène de dégazage, mais ne pourrait l'éliminer.

Actuellement, lorsque l'on souhaite faire un vide qui demeure sensiblement constant

68. Sans s'aventurer dans des conjectures toujours dangereuses quant à l'unicité de la méthode de réglage utilisée par Guye et Lavanchy, nous n'avons pas trouvé d'autres exemples d'un tel procédé pour le réglage des tubes cathodiques.

69. En réalité, nous n'arrêtions pas la pompe mais isolions le tube du groupe de pompage grâce à une vanne placée entre les deux. Nous dirons que nous fermions le tube.

70. Muller (1918, p. 6). Nous avons également effectué le calcul approximatif de ce courant, grâce au logiciel développé par M. Antonio Carlos M. de Queiroz que nous tenons à remercier ici pour son aide précieuse sur le fonctionnement des machines électrostatiques ; de Queiroz.

dans une enceinte [71], on procède à un pompage long et intense de l'enceinte à vider, elle-même placée dans un four. La température élevée permet le dégazage des gaz occlus qui sont extraits de l'enceinte. Le principe de cette technique du vide était déjà connu au début du XX^{e} siècle [72]. Guye et Ratnowsky y font référence dans leur article de 1911 :

> "Afin d'éviter le dégagement progressif de gaz par les parois du tube et les pièces métalliques qui se trouvent à l'intérieur, nous avons préalablement chauffé à plusieurs reprises le tube à une température de 100 à 200 degrés, et cela en faisant activement fonctionner la pompe." [73]

Guye et Lavanchy ne font pas mention d'une telle technique. Ils ne donnent d'ailleurs aucune précision sur le vide dans leur tube si ce n'est la spécification de la pompe utilisée, une "pompe Gaede combinée à une pompe avec enveloppe" [74]. Elle correspond au second modèle de pompe proposée par l'ingénieur allemand Wolfgang Gaede en 1912, après la pompe rotative à mercure qui arrive sur le marché en 1908 [75]. Cette dernière était utilisée dans l'expérience avec Ratnowsky. Sans entrer dans les détails techniques, ces deux pompes nécessitent l'emploi d'une pompe primaire pour effectuer un vide préparatoire. Leur capacités sont toutefois différentes. Avec la pompe rotative, le vide maximal est de 10^{-5} $mm\ Hg$. Avec la pompe moléculaire, il peut être inférieur à 10^{-6} $mm\ Hg$ [76].

Les meilleures performances de la pompe moléculaire ont certainement été mises à profit par Guye et Lavanchy, ce qui peut justifier qu'ils n'aient pas eu à mettre en œuvre des techniques comme le chauffage ou encore l'utilisation de charbon. Nous avons toutefois essayé de chauffer le tube cathodique et celui le reliant à la pompe, pensant que cette technique pouvait être suffisamment classique pour ne pas être citée. Cependant, du fait de la cire employée pour assurer les soudures verre-métal, il n'était pas possible de chauffer le tube dans un four. Ceci n'était pas le cas avec le tube de Guye et Ratnowsky. Nous avons tout de même pu chauffer certaines parties du tube, mais cela n'a produit aucun effet observable sur la qualité du vide.

71. Comme c'est le cas par exemple dans le récipients d'azote liquide dont l'isolation thermique est réalisée par de l'air à très basse pression dans les parois.
72. Voir par exemple Dunoyer (1924).
73. Guye et Ratnowsky (1911, p. 307).
74. Guye et Lavanchy (1916, p. 356). Voir ğ 3.3.1 pour les détails sur l'acquisition de cette machine.
75. Voir la biographie de Gaede par Brachner (1991) ainsi que le livre qu'il a consacré à l'histoire des pompes à vide, Brachner (2002).
76. Ces données sont tirées de Brachner (1991), Brachner (2002), Nachfolger (1913) et Dunoyer (1924).

Ce travail d'amélioration du vide s'est poursuivi tout au long des essais que nous faisions pour parvenir à obtenir une émission cathodique suffisamment stable pour envisager de procéder à des mesures. Il s'est avéré que la meilleure façon de faire était d'une part de procéder à un nettoyage complet de l'enceinte et des pièces métalliques, et d'autre part de laisser tourner la pompe le plus longtemps possible. Nous avons par ailleurs remarqué qu'au cours de cette phase de plusieurs semaines durant laquelle nous n'avons pas ouvert le tube, la qualité du vide avait été sensiblement améliorée [77].

A ce stade des expérimentations que nous concevions comme une phase préalable à la reconstitution de l'activité de mesure, nous parvenions à produire des rayons cathodiques sans trop de difficultés jusqu'à des tensions de 30 kV environ. Mais la durée pendant laquelle il était possible d'observer le spot était limitée à moins d'une minute, du fait de l'augmentation de pression qui persistait, malgré l'amélioration de la qualité du vide. Au delà de 30 kV, cela s'avérait beaucoup plus complexe. Souvent, des étincelles partaient de la cathode, et une fois ce processus déclenché, il avait tendance à s'emballer de façon incontrôlable. Cela signifiait que la différence de potentiel entre les électrodes était trop élevée, et que nous *rations* le domaine de décharge luminescente dans lequel l'émission cathodique se produisait.

Ces difficultés ont été partiellement surmontées lorsque nous avons pu utiliser la poudre de tungstate de calcium pour faire un écran fluorescent [78], puisque cela a eu pour effet de rendre le spot visible pour des intensités beaucoup plus faibles. Avec le verre seul, il était visible pour des intensités débitées par la machine d'environ 10^{-2} mA. Avec l'écran fluorescent, ce seuil à partir duquel le spot devenait observable était rabaissé à environ 10^{-6} mA. A de telles intensités, l'augmentation de pression due aux chocs des électrons et des ions positifs sur des parois non parfaitement dégazées est beaucoup plus faible. Ainsi, le processus d'émission d'électrons ne s'emballe pas comme c'est le cas pour des intensités plus élevées. Nous avons constaté qu'en effet, il était désormais possible d'observer un spot pendant quelques minutes, et ce jusqu'à des tensions d'environ 50 kV.

Il devenait ainsi possible de procéder à des mesures dans la plage de tensions 15-50 kV.

77. Ceci tient au fait que les parois ayant dégazé au cours du pompage n'étaient pas remises à la pression atmosphérique. Ainsi, chaque nouvelle phase de pompage améliorait la qualité du vide, contrairement à ce qui se passait lorsque nous manipulions le tube pour procéder à différents réglages, puisqu'alors le travail de nettoyage par le pompage devait être repris depuis le début.

78. Nous explicitons par la suite comment la déposition de la poudre sur l'écran a été réalisée [§ 4.3.3.3].

Pour des tensions plus élevées, le contrôle de l'émission était rendu pour l'heure presque impossible par les étincelles au niveau de la cathode qui perturbaient fortement le fonctionnement du tube. Ceci tend à montrer toute l'importance du réglage de l'alimentation électrique du tube pour limiter ces phénomènes parasites.

L'amélioration de la qualité du vide, combinée à l'utilisation d'un moyen de *visualisation* du spot adéquat, ont permis d'étendre la durée pendant laquelle le phénomène observé — l'impact sur l'écran d'électrons accélérés sous des tensions jusqu'à 50 kV — est stable.

Ceci constitue une partie de ce que Guye et Lavanchy appellent *obtenir un bon fonctionnement du tube cathodique*. La stabilité de la pression dans le tube est assurée, et les conditions d'observation du phénomène — l'impact des électrons sur l'écran fluorescent — permettent de travailler dans un régime d'émission stable [79].

En revanche, le contrôle de l'alimentation du tube n'est pas réalisé. Or il ressort du travail effectué jusque là qu'il devient crucial au delà de 50 kV, et donc que la stabilité de la pression et l'utilisation de moyens d'observation adéquats sont nécessaires mais non suffisantes.

79. Il convient de garder présent à l'esprit que *stabilité* est ici à entendre comme *évolution suffisamment lente*. L'adverbe *suffisamment* est défini par l'utilisateur : pour Guye et Lavanchy, il s'agissait que l'évolution soit *suffisamment* lente pour qu'ils puissent observer un spot pendant quelques minutes.

4.3 Prise de mesures

4.3.1 Objectifs

Dès lors qu'il était devenu possible de contrôler l'émission cathodique dans le dispositif reconstruit, la troisième phase de la réplication de l'expérience de Guye et Lavanchy a pu débuter : la reconstruction d'un dispositif expérimental destiné à mesurer la variation de l'inertie des électrons avec leur vitesse.

A ce stade, un certain nombre d'éléments sont encore à intégrer au dispositif qui ne permet *que* de réaliser l'émission cathodique, pour des potentiels de décharges inférieurs à 50 kV. En effet, hormis le tube cathodique, seul le dispositif de compensation du champ magnétique terrestre a été reconstruit. Il reste donc à mettre au point le dispositif de déviation magnétique et son alimentation, l'alimentation du condensateur assurant la déviation électrique, le dispositif de mesure des tensions et intensités de déviation, les interrupteurs et commutateurs permettant d'alterner les déviations et leur sens et, enfin, le dispositif d'enregistrement photographique des déviations.

Ces éléments constituent un complément nécessaire du dispositif minimal, mis au point au cours des recherches sur l'émission cathodique et sa stabilité, en vue de pouvoir réaliser des mesures de la variation de l'inertie. Leur construction devait donc permettre de passer à une phase que l'on pourrait appeler *reconstruction de l'activité expérimentale de prise de mesure.*

Une question se pose néanmoins. L'obtention d'une émission cathodique la plus stable possible est apparue comme une *activité expérimentale* avec ses enjeux et difficultés propres. Dès lors, n'est-il pas vain de chercher à réaliser des mesures alors que le dispositif de production de l'émission cathodique n'est pas celui de Guye et Lavanchy ?

Une réplication historique n'a en effet pas pour objectif unique l'obtention d'un *tableau de mesure* qu'il s'agirait de comparer avec les mesures données pas les acteurs historiques. Le but est plutôt de comprendre comment le *tableau de mesure* a été obtenu. A ce titre, se rapprocher au mieux des conditions dans lesquelles l'expérience originale a été conduite paraît être une nécessité méthodologique.

A nouveau l'historien en situation de réplication se trouve face à des questions qu'il ne peut éviter. Dans ce cas précis, il s'agit de choisir entre deux possibilités : poursuivre le travail relatif à l'émission cathodique en insérant au dispositif une

source de tension similaire à la machine électrostatique utilisée dans l'expérience originale, ou bien poursuivre avec l'alimentation moderne et compléter le dispositif.

Nous avons choisi la seconde option. D'une part, cela nous permettait de nous exercer toujours mieux à maîtriser l'émission cathodique. D'autre part, le travail sur une machine électrostatique prendrait vraisemblablement du temps, et il semblait plus raisonnable, dans le cadre de cette thèse, de compléter le dispositif avant de se pencher sur des aspects plus particuliers comme l'utilisation d'une machine électrostatique ou encore d'une pompe à vide d'époque.

Quels éléments du dispositif de vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein restaient à reconstruire ? Les cadres compensateurs du champ magnétique terrestre ont été construits lors de la phase d'investigation sur la stabilité de l'émission cathodique. Le condensateur de déviation électrique du faisceau a quant à lui été construit en même temps que le tube au sein duquel il est inséré.

Nous devions donc reconstruire un dispositif complet permettant de réaliser les doubles-déviations électrique et magnétique et de mesurer la tension et le courant de déviation. De plus, il fallait mettre au point le dispositif d'enregistrement photographique.

4.3.2 Déviations électrique et magnétique des rayons cathodiques

4.3.2.1 Les bobines magnétiques

La déviation magnétique[80] est assurée par une paire de bobines magnétiques parcourues par un courant électrique I.

> "5. *Champ magnétique.*—Le champ magnétique était fourni par une paire de bobines placées de façon à produire une déviation verticale du faisceau cathodique, et parcourues par un courant provenant d'une batterie d'accumulateurs de grande capacité.
>
> Nous avons adopté des bobines de petit diamètre, 8 c/m environ ; car elles ont l'avantage de donner un champ magnétique très faible dans la région voisine de la cathode, région dans laquelle les électrons prennent leur vitesse. Une étude expérimentale a en effet montré que l'action de ce champ, au voisinage de la cathode était tout à fait négligeable, étant données les grandes dimensions de notre tube et les faibles dimensions des bobines." (Guye et Lavanchy, 1916, p.359)

80. Le condensateur de déviation électrique a été décrit aux § 4.1.3.4 et § 4.1.4.2.3.

La description des bobines est assez brève. En fait, Guye et Lavanchy mentionnent surtout les points sur lesquels s'est portée leur attention : stabilité du courant parcourant les bobines, localisation du champ magnétique sur une petite partie de la trajectoire des rayons. La construction des bobines n'est pas abordée, sans doute du fait du caractère commun de ces objets.

Le seul élément textuel permettant d'aborder leur reconstruction est ainsi leur diamètre – 8 cm. Pour le reste — nombre d'enroulements, diamètre du fil utilisé, courant parcourant la bobine — Guye et Lavanchy ne donnent aucune précision. Nous avons utilisé pour cela différentes informations présentes dans les articles, et en particulier dans le mémoire. Les ordres de grandeurs de la vitesse des rayons et de la déviation magnétique sur l'écran, ainsi que les dimensions du tube cathodique nous ont donné l'ordre de grandeur du courant total parcourant la bobine [81] : $\approx 30\ A$.

Ici, nous avons utilisé les informations tirées de la photographie en gros plan du tube cathodique placé au sein du dispositif, donnée dans le mémoire de 1921 [voir fig. 4.2]. Sur celle-ci, il est possible de se faire une idée approximative du nombre d'enroulements utilisés pour réaliser les bobines de déviation magnétique. La section des enroulements est d'environ $1,5 \times 1,5\ cm^2$ [voir fig. 4.18] sur les bobines originales. Cela constituait un élément à prendre en compte pour la construction de nouvelles bobines.

Nous avons utilisé 300 enroulements avec un fil, en cuivre, de diamètre 0,8 mm, ce qui nous a donné des dimensions sensiblement équivalentes à celles estimées sur la photographie.

4.3.2.2 Les alimentations des bobines et du condensateur

Les bobines magnétiques et le condensateur électriques sont alimentées chacun par une source différente. Pour les premières, Guye et Lavanchy utilisent une "batterie d'accumulateurs de grande capacité" [82]. Pour le second, ils utilisent une "batterie de [250] piles sèches pour lampes électriques de poche". A ce sujet, ils précisent qu'une "telle batterie donne une tension très constante, surtout si l'on a soin de remplacer au fur et à mesure les éléments défectueux" [83].

Cette remarque est la seule référence directe à une contrainte nécessaire, la sta-

81. Ce que nous appelons ici "courant total" est simplement le courant parcourant un enroulement, multiplié par le nombre d'enroulements.
82. Guye et Lavanchy (1916, p. 359).
83. Guye et Lavanchy (1916, p. 358).

FIGURE 4.18 – Gros plan sur les bobines magnétiques utilisées par Guye et Lavanchy (GUYE, 1921).

bilité des sources des champs de déviation.

Dans le cadre de la reconstruction du dispositif expérimental, nous avons fait le choix , dans un premier temps, de ne pas reconstruire de telles batteries. Nous avons ainsi utilisé des générateurs modernes empruntés à l'École de physique de l'Université de Genève, délivrant également une tension et un courant suffisamment stables pour être utilisé dans cette expérience.

Les alimentations sont donc décrites de façon assez imprécise. En fait, seule la description de la batterie de piles comporte des informations complémentaires. Elle doit permettre de fournir une tension d'"environ 1000 V"[84], et être branchée de façon à "charger les plateaux [du condensateur] symétriquement aux potentiels + $\frac{V}{2}$ et - $\frac{V}{2}$"[85]. Ces deux conditions pouvaient être remplies avec le générateur que nous avons utilisé.

4.3.2.3 Les interrupteurs et commutateurs

Les déviations électrique et magnétique du faisceau cathodique sont commandées par un système d'interrupteurs-commutateurs permettant de choisir le type de déviation ainsi que son sens. C'est donc par l'intermédiaire de ce système de commande que l'expérimentateur applique les déviations au faisceau, mais aussi choisit quelle grandeur mesurer entre la tension et l'intensité de déviation.

Encore une fois, les détails concernant ce dispositif manquent dans les articles de Guye et Lavanchy qui rappellent uniquement les contraintes liées à leur utilisation. Ceux-ci doivent être maniables rapidement dans l'obscurité. En particulier, les auteurs ne précisent pas s'ils ont pris des précautions particulières liées à leur fonctionnement électrique afin, par exemple, de prévenir les chutes de tensions possibles. La réponse à cette interrogation est très certainement positive. Nous avons pour notre part fait attention à ce type de problème.

> "Les interrupteurs étaient placés de telle sorte que ... "[86]

Au cours des recherches que nous avons effectuées à l'Ecole de Physique de l'Université de Genève, nous avons trouvé différents types d'interrupteurs mécaniques. Du fait du manque d'informations relatives à ce dispositif, aussi bien écrites que photographiques, nous avons choisi le type d'interrupteur nous semblant le plus adéquat.

84. Guye et Lavanchy (1916, p. 359).
85. Guye et Lavanchy (1916, p. 359).
86. Guye et Lavanchy (1916, p. 360).

En premier lieu, il doit s'agir d'un interrupteur permettant la commutation [87]. Il doit donc posséder 6 bornes, comme indiqué sur le schéma électrique du dispositif expérimental de Guye et Lavanchy [voir fig. 3.6]. En second lieu, ces interrupteurs seront utilisés dans l'obscurité. Ceci impliquait des contraintes de taille minimale afin de pouvoir les manipuler sans désagrément. Ce critère de taille était également important relativement aux différences de tension utilisées, de l'ordre de 500 à 1000 V.

Parmi les interrupteurs à notre disposition, un seul répondait à ces contraintes [voir fig. 4.19].

FIGURE 4.19 – L'interrupteur-commutateur ayant servi de modèle à notre système d'interrupteurs-commutateurs

A partir de ce modèle, nous avons pu faire construire un dispositif complet de 5 interrupteurs-commutateurs destinés à être utilisés au sein du dispositif expérimental reconstruit [voir fig. 4.20].

4.3.3 Les mesures dans le dispositif de Guye et Lavanchy

4.3.3.1 Organisation chronologique de la réplication, contraintes de temps et contraintes matérielles.

Si l'on devait résumer le travail de l'expérimentateur à un travail de prise de mesures, l'expérience de Guye et Lavanchy se résumerait à la mesure d'une tension, d'une intensité et de deux distances sur un cliché photographique. Le travail réalisé au cours de la phase d'investigation a, quant à lui, montré toute l'importance d'une

87. Par commutation, nous entendons la possibilité de relier un dipôle donné (le condensateur, les bobines, les alimentations ou le milliampèremètre) à une partie ou l'autre du circuit.

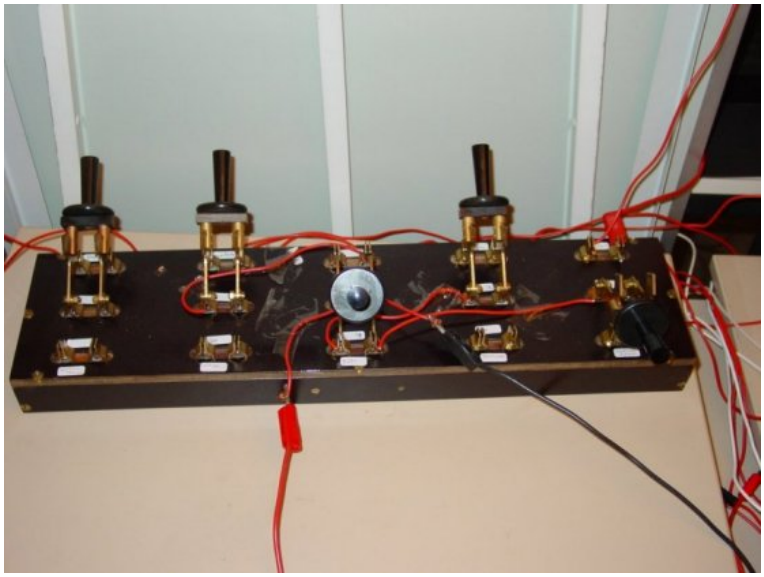

FIGURE 4.20 – Dispositif d'interrupteurs et de commutateurs reconstruits

grande maîtrise du phénomène cathodique, des techniques du vide et du fonctionnement d'une machine électrostatique.

Ces deux aspects, *a priori* différents, ne vont néanmoins pas l'un sans l'autre. Ainsi, une réplication la plus poussée possible se doit de prendre en compte cette (ces ?) interaction(s). Dans ce travail, nous avons choisi de faire fonctionner le dispositif le plus possible, quitte à employer du matériel moderne avant de le remplacer par du matériel reconstruit ou du matériel s'approchant le plus possible de l'original.

Au moment où nous avons commencé à lancer la reconstruction du dispositif expérimental "complet", nous ne disposions pas d'un ampèremètre ou d'un appareil photographique identiques à ceux utilisés par Guye et Lavanchy. Les rechercher ou les reconstruire allait donc constituer une étape à part entière du travail de réplication. Il était en revanche facile de se procurer un multimètre digital ou un appareil photographique numérique. Tout en sachant que cela nous éloignait de l'expérience originale, nous pensions que cela nous placerait en situation de réaliser des mesures de déviation d'un faisceau cathodique que nous apprenions encore à contrôler.

Dix mois après avoir observé pour la première fois des rayons cathodiques, nous étions ainsi en mesure de réaliser la première prise de mesure de déviation d'un faisceau. Nous avions un dispositif complet, que nous pensions alors pouvoir rap-

procher peu à peu de l'original. Le tube cathodique, le dispositif de compensation du champ magnétique terrestre, les interrupteurs et commutateurs, ainsi que la substance fluorescente permettant une meilleure visualisation du spot, correspondaient au dispositif original. La pompe à vide, l'alimentation haute tension, l'appareil de mesure de la tension et du courant de déviation, ainsi que l'appareil photographique s'en écartaient.

Il paraissait assez compliqué de reconstruire ou de récupérer une pompe à vide de type Gaede. La construction d'un appareil photographique aussi particulier que celui utilisé par Guye et Lavanchy [88] semblait *a priori* possible. En revanche, l'utilisation de plaques photographiques en verre semblait compromise. Il aurait fallu en fabriquer de nouvelles, ce qui constituait en soi un travail conséquent.

Deux possibilités s'offraient alors à nous. Retrouver et remettre en état de fonctionnement un ampèremètre du même type que l'original, ou bien alors rénover la machine électrostatique conservée au Musée. Nous avons opté pour la seconde solution. Nous avons donc mené un travail de rénovation de la machine de Töpler conservée au Musée d'histoire des sciences de Genève et utilisée par Guye et Ratnowsky au cours des mesures des grandeurs de comparaison. Nous avons fait reconstruire les plateaux de verres et différents éléments de cette machine et sommes parvenu, après un long travail, à produire un faisceau cathodique accéléré sous une tension ne dépassant pas 15 kV [89]. Après l'échec de cette tentative, nous avons repris l'expérimentation avec les appareils modernes.

4.3.3.2 Mesure de l'intensité et de la tension de déviation

Détails sur le milliampèremètre de Siemens et Halske Dans l'expérience de Guye et Lavanchy, la mesure de l'intensité et de la tension de déviation se fait avec un seul et même appareil : un milliampèremètre de Siemens et Halske [90]

88. La description de cet appareil est donnée ci-dessous. Nous n'avons pas retrouvé, ni au Musée d'Histoire des Sciences, ni à l'Ecole de Physique l'appareil photographique original.

89. Cet épisode souligne la difficulté déjà évoquée de la réplication d'expériences dans lesquelles sont convoqués de multiples savoir-faire et instruments.

90. On trouve la preuve de l'achat de cet appareil dans le *Répertoire et registre des instruments du cabinet de physique* sous le numéro 2744 : "Ampèremètre-voltmètre universel avec 5 résistances shunt pour ampèremètre et 1 pour 15 et 150 V. Entrée : 1908 ; 450 frs ; Siemens & Halske Berlin [...]". A titre de comparaison, la pompe rotative de Gaede coûtait la même année 600 francs, et la batterie de 400 piles et 44 accumulateurs utilisée par Guye et Ratnowsky coûtait 200 francs. Ce milliampèremètre constitue en fait l'un des appareils les plus onéreux possédés au laboratoire de physique en 1908. En 1914, quand Guye et Lavanchy procèdent aux achats de la machine de Wimshurst et de la nouvelle pompe moléculaire de Gaede, ils utilisent le même milliampèremètre.

Cet appareil de précision leur permettait de mesurer le courant électrique de déviation au moyen d'un shunt et la tension au moyen d'une résistance de précision placée avant le milliampèremètre [91]. D'après Guye et Lavanchy, la lecture sur cet appareil se fait au dixième de division, ce qui, sur des mesures toujours supérieures à 30 divisions, donne une précision relative supérieure à 0,33 %.

> "La graduation de ce milliampèremètre permet, grâce à sa netteté, de faire des lectures au dixième de division. Et comme sur l'instrument, nos mesures les plus faibles étaient encore supérieures à 30 divisions, on pouvait donc dans la grande majorité des cas mesurer I et V à moins de 1/4 %." [92]

En plus de ces remarques sur la précision de lecture avec le milliampèremètre de Siemens et Halske, Guye et Lavanchy sont attentifs aux précautions nécessaires pour éviter toute erreur systématique. Ils prennent soin de vérifier l'homogénéité de l'échelle sur l'instrument.

> "Il fallait, pour éviter toute erreur systématique, vérifier avec une soin tout particulier la graduation de l'instrument. Ce contrôle, nous l'avons fait à diverses reprises au cours de nos expériences. L'homogénéité de l'échelle a toujours été trouvée exacte, aux erreurs d'expérience près bien entendu." [93]

Nos appareils de mesure Comme nous l'avons précisé plus haut, nous n'avons pas retrouvé le milliampèremètre utilisé par Guye au cours de ses expériences. Nous n'avons pas non plus utilisé d'ampèremètre s'en approchant car nous n'avons pas eu le temps de nous pencher sur cet aspect de la réplication.

Ainsi, l'appareil de mesure que nous avons utilisé est beaucoup trop différent de l'original pour pouvoir comparer les procédures ou pour tenter de les transposer [94]. Nous avons donc opté pour deux appareils de mesure : un premier pour mesurer l'intensité de déviation, un second pour la tension.

Ce nouvel écart au dispositif original peut sembler incongru. Il s'est imposé du fait des limitations du générateur fournissant la tension de déviation électrique.

Les deux nouveaux instruments ont alors coûté respectivement 1500 francs et 1360 francs, ce qui, compte tenu de l'augmentation des prix durant la période 1910-1914 observée sur le prix d'une pompe rotative de Gaede (650 francs en 1910 contre 875 francs en 1914), place le milliampèremètre toujours parmi les instruments relativement coûteux.

91. voir fig. 3.6 pour le schéma électrique du dispositif de déviation et de mesure. Sur celui-ci, le shunt est noté S et la résistance R.

92. Guye et Lavanchy (1916, p. 360).

93. Guye et Lavanchy (1916, p. 359).

94. Nous reviendrons sur ce point et les questions qui se posent relativement à nos choix : en quoi posent-ils problème à l'historien ? En quoi peuvent-ils néanmoins être acceptables ?

En effet, celui-ci ne pouvait débiter un courant supérieur à quelques dizaines de microampères. Il aurait donc fallu utiliser des résistances relativement élevées ce qui aurait nui à la précision de leur mesure. Ainsi, nous avons préféré nous écarter de la démarche originale mise au point par Guye et Ratnowsky et utilisée à nouveau par Guye et Lavanchy.

L'ampèremètre que nous avons utilisé est un multimètre Metex M-4650, pour lequel l'erreur sur la mesure de l'intensité est de 0,8% ± 5 digits. Les valeurs des intensités de déviation magnétique dans nos expériences étaient de l'ordre de 0,300 A, ce qui donne une incertitude relative d'environ 2,5 %. Cette incertitude est plus importante que celle annoncée par Guye et Lavanchy.

Le voltmètre que nous avons utilisé est un multimètre Voltcraft VC260, pour lequel l'erreur sur la mesure de la tension est de 0,8 % ± 1 digit. Pour les valeurs de tension utilisées, en moyenne 500 V, cela correspond à une incertitude relative d'environ 1 %. La encore, l'incertitude est plus importante que celle annoncée par Guye et Lavanchy.

4.3.3.3 Dispositif de visualisation et d'enregistrement des déviations

Nous avons décrit au chapitre 3.3.1 comment la prise en compte des difficultés à observer les déviations directement sur le fond du tube a conduit Guye et Lavanchy à mettre au point un dispositif complet de *visualisation* et d'*enregistrement* des déviations. D'une part, l'écran n'est plus simplement constitué par le verre mais par une couche fluorescente de tungstate de calcium. D'autre part, l'observateur n'effectue pas de pointé ou de mesure sur l'écran mais sur un cliché photographique, enregistrement d'une série de *déterminations*.

Réalisation d'un écran au tungstate de calcium Nous avons explicité plus haut les conséquences de la réalisation d'un écran au tungstate de calcium sur la visualisation de l'impact des rayons cathodiques. Ainsi, nous avons mis en évidence toute l'importance d'un dispositif de visualisation judicieusement choisi. Avant de pouvoir formuler cette conclusion, il nous a fallu parvenir à réaliser une déposition correcte de tungstate de calcium.

Le tungstate de calcium est également appelé *tungstate de chaux*. C'est la dénomination utilisée par Guye et Lavanchy, et plus généralement dans les milieux

francophones [95]. On le trouve également sous l'appellation de *scheelite*, en référence à Scheele. La propriété de fluorescence de cette substance semble avoir été tout d'abord mise à profit par Thomas A. Edison. Très vite, le tungstate de calcium devient l'une des substances les plus utilisées dans la confection d'écrans *renforçateurs* [96]. Il s'avère être le mieux adapté pour la radiographie X.

> "Parmi les matériaux fluorescents aux rayons X dans un domaine de fréquence s'étendant de l'ultra-violet jusqu'au rouge, très peu peuvent être utilisés efficacement pour l'intensification photographique. [...] Parmi elles, le tungstate de calcium cristallin est de loin le meilleur, avec les matériaux actuels de photographie par rayons X. [...]" [97] [98]

Ces quelques informations sur l'utilisation d'écrans au tungstate de calcium au début du XX^{e} siècle ne permettent pas de savoir comment Guye et Lavanchy réalisent la "déposition" de cette poudre sur leur écran de verre.

Au cours des premiers essais de déposition, nous saupoudrions le tungstate de calcium au-dessus de l'écran préalablement imbibé d'alcool. Après évaporation de l'alcool, la poudre restait collée à l'écran. L'inconvénient de cette méthode était que la couche de tungstate de calcium n'était pas homogène. L'effet de cette inhomogénéité sur la visualisation était assez flagrant. Le spot sur l'écran était visible pour des intensités assez faibles, mais il n'était pas bien défini. De plus, l'intensité lumineuse du spot dépendait du lieu d'impact, c'est-à-dire de l'épaisseur de la couche fluorescente.

Nous avons alors procédé différemment. Nous ne saupoudrions plus le tungstate de calcium, nous le déposions et l'étalions avec un rouleau sur l'écran imbibé d'alcool.

Après un certain nombre d'essais, nous sommes parvenus à obtenir une couche relativement homogène, si bien qu'il devenait a priori possible d'utiliser l'écran ainsi constitué dans le cadre de mesures et d'enregistrement de déviations électrique et magnétique des rayons cathodiques.

Nous décrivons les premières mesures de la variation de l'inertie des électrons avec leur vitesse au chapitre suivant [voir chapitre 4.3.5.2]. L'une des conclusions

95. C'est ainsi que nous le trouvons répertorié dans les ouvrages de chimie du début du XX^{e} siècle. Voir par exemple Frémy (1924).

96. Lefebvre (1997).

97. "Of the materials which fluoresce to x-rays in the range of frequencies from the ultra-violet to the red, there are only a few which can be used efficiently for photographic intensification. [...] Of these, crystalline calcium tungstate is by far the best, with present photographic x-ray materials."

98. Hodgson (1918, p. 432).

de cette étape expérimentale a été de nous faire revenir à la réalisation de l'écran au tungstate de calcium. En effet, au cours des mesures, nous avons pu mettre en évidence l'importance d'avoir une couche de substance fluorescente la plus homogène possible, avec une poudre la plus fine possible. Sans ces deux précautions, nous ne pouvions réaliser de mesure précise aux faibles vitesses.

Nous avons donc repris la réalisation de l'écran fluorescent. Cette fois, nous avons procédé à une déposition par sédimentation [99]. Nous avons procédé de la façon suivante.

Dans un grand bécher rempli d'eau, nous versions de la poudre de tungstate de calcium , puis nous agitions le tout. Très rapidement, les particules les plus lourdes se déposaient au fond du bécher. Alors, nous insérions le disque de verre qui allait constituer l'écran. Il était placé au fond du bécher tout en étant maintenu par un système de câbles afin de pouvoir le ressortir facilement. Après une dizaine d'heures, toute la poudre était retombée. Il ne restait plus qu'à sortir l'écran, très lentement afin de ne pas disperser la poudre qui avait formé une couche homogène à la surface du verre, puis à le laisser sécher.

Les expériences avec cet écran fluorescent ont montré la bonne homogénéité de la couche de tungstate de calcium.

L'enregistrement photographique Dans le dispositif de Guye et Lavanchy, les déviations sont enregistrées au moyen d'un appareil photographique. Cet instrument et cette méthode expérimentale sont mis en avant par Guye et Lavanchy comme une *amélioration* du dispositif par rapport à celui utilisé quelques années plus tôt.

> "[...] il subsistait deux inconvénients importants inhérents au principe de la méthode [des trajectoires identiques] elle-même, et signalés déjà du reste par ses auteurs : l'erreur sur le pointé pouvait, sur une mesure isolée, atteindre environ 1 1/2 % ; et surtout la méthode ne permettait pas des déterminations rapides, la variation de dureté [100] du tube au cours d'une même expérience constituant une difficulté importante des recherches sur les rayons cathodiques de grande vitesse. Nous avons donc cherché, tout en lui conservant ses avantages, à perfectionner la méthode précédente de façon à augmenter le plus possible et la

99. Cette méthode nous a été proposée par M. Werner Kloeti que nous remercions tout particulièrement.

100. La "dureté" est un terme issu du vocabulaire de la physique des rayons X. Des rayons X "durs" peuvent traverser des obstacles plus importants, à l'inverse des rayons X "mous". Les premiers sont produits par des rayons cathodiques accélérés sous de hauts potentiels, c'est-à-dire, lorsque la pression dans le tube est basse. Dans le cas des rayosn "mous", c'est l'inverse. Les auteurs parlent alors de "dureté" des tubes cathodiques en référence à la pression de l'air résiduel.

> rapidité des déterminations et la précision du pointé. Nous y sommes parvenus en substituant un *enregistrement photographique rapide* aux tâtonnements que nécessitaient quatres lectures directes et successives correspondant à des déviations rigoureusement les mêmes." [101]

Ce passage pose l'expérience de Guye et Lavanchy comme une suite plus poussée de l'expérience de Guye et Ratnowsky et non pas comme une innovation. Mais il nous semble plus important encore de souligner que c'est bien l' "*enregistrement photographique rapide*" qui constitue la source d'amélioration et même de dépassement des "inconvénients" inhérents à la première expérience.

Ce point est encore rendu plus apparent dans la description du dispositif telle que proposée par Guye et Lavanchy quelques pages après le passage précédemment cité. Les auteurs consacrent en effet 4 pages à la description et l'analyse de ce qu'ils appellent le "dispositif photographique".

Nous n'avons pas eu la possibilité de travailler avec un dispositif techniquement proche de l'original [102]. Comme nous l'avons fait dans les situations semblables que nous avions rencontrées précédemment, nous avons concentré notre attention sur le principe de fonctionnement de ce dispositif, les contraintes matérielles en lien avec le fonctionnement du tube cathodique et l'analyse des écarts entre le matériel moderne et l'original.

Combien de temps fallait-il à Guye et Lavanchy pour enregistrer une détermination complète ? Quelle était la sensibilité des plaques Bleues Lumière et Wellington d'une part, des Violettes Lumière et Capella d'autre part [103] ? La réponse à la première question est donnée par Guye et Lavanchy qui font le lien entre rapidité d'impression et maniement du dispositif :

> "[...] une détermination, composée d'une double déviation magnétique et d'une double déviation électrique se faisait, *avec un peu d'habitude*, en moins de cinq secondes ; exceptionnellement la pose a été plus longue pour les très grandes vitesses, environ dix secondes." [104]

101. Guye et Lavanchy (1916, Souligné dans le texte. p. 296-297).
102. Nous n'avons trouvé, ni au Musée, ni dans à l'Ecole de Physique, l'appareil photographique original. Nous n'avons pas non plus eu le temps de nous consacrer à l'éventuelle reconstruction de plaques photographiques similaires à celles utilisées par Guye et Lavanchy. Il est aujourd'hui possible d'en retrouver des "vierges", mais de forts doutes subsistent quant à leur utilisation possible.
103. Guye et Lavanchy précisent le type de plaques utilisées. Pour des vitesses "petites", les premières se montrent suffisantes du point de vue de leur sensibilité. Pour de plus "grandes" vitesses en revanche, ils utilisent le second type de plaques, d'une "extrême sensibilité" Guye et Lavanchy (1916, p. 362).
104. Guye et Lavanchy (1916, Souligné par nous. p. 362).

Nous n'avons en revanche pas trouvé de réponse précise à la seconde question. En unités modernes, la sensibilité des plaques utilisées par Guye et Lavanchy devait être d'environ une dizaine d'ISO.

Avec l'appareil numérique dont nous disposions, il n'était pas possible d'enregistrer plusieurs déterminations sur un seul et même cliché. De plus, la sensibilité minimale était de 50 ISO.

A ce stade, nous cherchions principalement à nous donner les moyens de travailler sur un dispositif complet, afin, comme nous l'avons déjà souligné, de prendre l'"habitude" de l'émission cathodique et de la mesure de déviations. En ce sens, l'appareil numérique nous permettait d'atteindre cet objectif [105] : l'interaction entre le "dispositif d'enregistrement photographique", le tube cathodique et le dispositif de déviation se faisait jour, et nous devions apprendre à travailler avec.

L'appareil photographique original L'appareil photographique utilisé pour réaliser l'enregistrement des déviations du faisceau cathodique est schématisé dans l'article de Guye et Lavanchy [voir fig. 4.21]. On peut le voir également sur les photos annexées au Mémoire de 1921 [voir fig. 4.2 et 4.16]. Les figures 4.22 et 4.23 sont des agrandissements permettant de mieux voir l'appareil photographique.

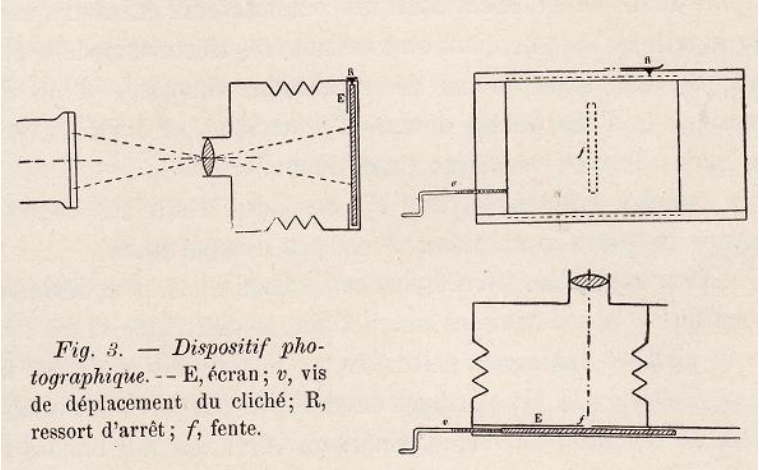

Fig. 3. — Dispositif photographique. — E, écran ; *v*, vis de déplacement du cliché ; R, ressort d'arrêt ; *f*, fente.

FIGURE 4.21 – Schéma des modifications apportées à l'appareil photographique par Guye et Lavanchy (GUYE, 1921, p. 327).

105. Notons à ce sujet que "le" numérique évacue la problématique du développement des clichés... pour la reporter à une problématique de traitement informatique de l'image. Notons également que Guye et Lavanchy n'abordent pas du tout cette question.

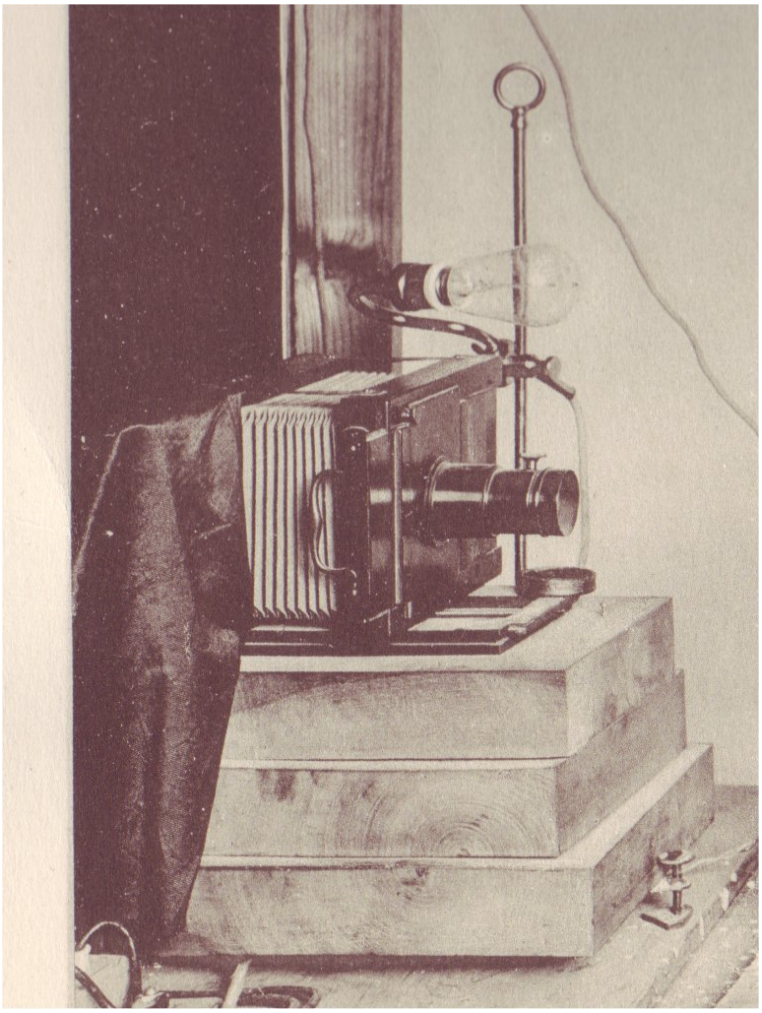

FIGURE 4.22 – L'appareil photographique original - Agrandissement (1^{re} vue) (GUYE, 1921, planche 5).

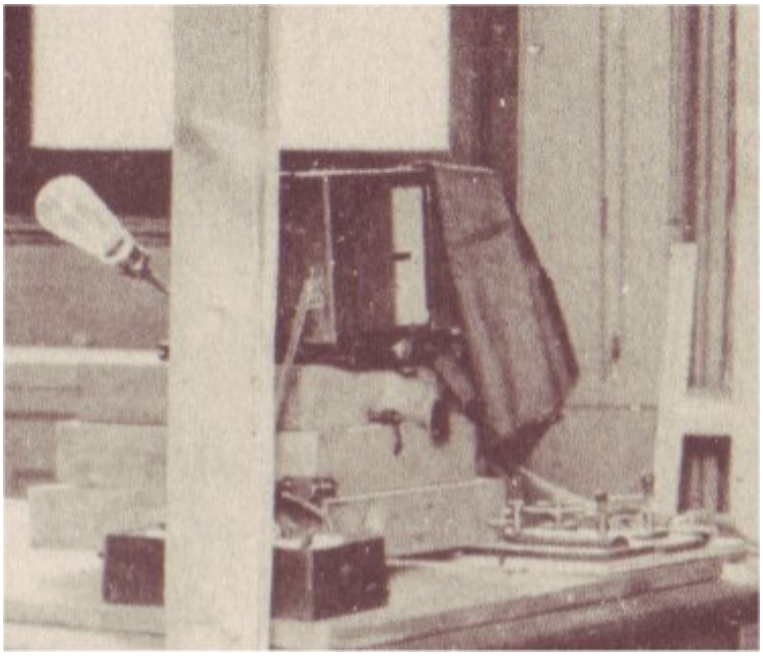

FIGURE 4.23 – L'appareil photographique original - Agrandissement (2^{me} vue).

La particularité de l'appareil n'est pas visible sur les photographies. Guye et Lavanchy précisent ce point.

Le rôle du dispositif photographique est de permettre l'enregistrement *précis* des déterminations. Afin de réduire les incertitudes dans les mesures, Guye et Lavanchy réalisent plusieurs fois la même mesure. L'utilisation d'une seule plaque photographique par détermination pose un problème pratique : il faut changer la plaque entre chaque mesure. Or, ceci prend du temps et nous avons vu qu'il est nécessaire de procéder rapidement afin d'éviter les variations de fonctionnement du tube cathodique. De plus, il faudrait manipuler l'appareil ce qui ne peut se faire sans modifier sa position.

Ces problèmes sont traités de la façon suivante.

> "La plaque photographique était portée par un châssis ; celui-ci, engagé dans un glissière, pouvait subir au moyen d'une vis v un déplacement latéral." [106]

Ainsi, pour ne pas avoir à manipuler l'appareil après chaque détermination, Guye et Lavanchy rajoutent un dispositif simple permettant de faire coulisser la plaque.

106. GUYE et LAVANCHY (1916, p. 360).

> "Un ressort R dont l'extrémité s'engageait dans une série de crans, permettait de faire progresser ce châssis d'une quantité toujours la même. Ainsi, chaque cliché était capable d'enregistrer tout un ensemble de déterminations, puisque une seule de ces déterminations, composée de deux déviations électriques et de deux déviations magnétiques toutes quatre verticales, n'utilisait qu'une bande très étroite de la plaque photographique." [107]

Le système de crans assure un déplacement régulier de la plaque photographique. Enfin, Guye et Lavanchy protègent le reste de la plaque contre la lumière parasite.

> "En outre, un écran E, dans lequel était découpée une fente f correspondant à la région où venait se former l'image des traces fluorescentes, protégeait le reste du cliché contre les rayons de lumière diffuse qui aurait pu pénétrer dans l'appareil." [108]

La figure ci-après [fig. 4.21] montre comment est réalisé le dispositif de déplacement de plaque photographique.

Notre appareil photographique Comme nous l'avons dit plus haut, nous n'avons pas retrouvé l'appareil photographique utilisé par Guye et Lavanchy. Nous avons au contraire utilisé un appareil photographique numérique vendu sur le marché [109].

Avec cet appareil, le temps de pose était réglable jusqu'à 15 secondes, et il était possible d'opérer presque entièrement manuellement. Contrairement à Guye et Lavanchy, nous ne pouvions enregistrer plusieurs déterminations par cliché, mais le maniement de cet appareil n'était pas perturbateur, une fois que les réglages avaient été effectués : il suffisait d'appuyer sur le déclencheur. Guye et Lavanchy n'avaient quant à eux qu'à tourner la vis de déplacement de la plaque.

Une contrainte importante liée à l'utilisation d'un appareil numérique est venue du temps d'acquisition de l'image. En effet, une fois le déclencheur appuyé, l'obturateur restait ouvert environ 10 secondes, le temps d'enregistrer une détermination complète. Une fois refermé, nous ne pouvions procéder à une seconde détermination avant une dizaine de secondes environ. Ce temps correspond au temps d'acquisition de l'appareil.

Cette particularité a constitué une réelle contrainte dans la prise de mesures car pendant le temps où Guye et Lavanchy enregistrent 2 déterminations, nous ne

107. Guye et Lavanchy (1916, p. 360-361).
108. Guye et Lavanchy (1916, p. 361).
109. Il s'agit d'un appareil de marque Canon et de type Power Shot A 520.

pouvions en enregistrer qu'une seule.

Mesure des déviations sur les clichés Guye et Lavanchy font preuve d'une attention particulière à la prévention de perturbations sur le dispositif d'enregistrement des déviations Toute vibration ou tout déplacement du dispositif est bien sûr à éviter. Mais ils attachent également beaucoup d'importance à la mesure des déviations sur les clichés.

En premier lieu, chaque cliché à son échelle propre, réalisée de la façon suivante. Deux croix très fines sont tracées sur la bande de tungstate de calcium. Ces *points de repère* étaient photographiés au début et la fin de chaque série de déterminations. Nous avons procédé de la même manière. Autrement dit, nous avons considéré que nous réalisions nous aussi des séries de déterminations, même si chaque cliché n'en comportait en réalité qu'une seule. Nous n'avons pu constater aucune modification mesurable entre la première et la seconde photo de ces points de repère.

La mesure de référence est donc celle de la distance entre les points de repère sur le tube. L'échelle est alors donnée par le rapport entre cette distance et celle correspondant sur le cliché. Sur le tube original, elle valait 69,2 mm. Sur le nôtre, elle valait 66,5 mm.

Les autres mesures sont celles des déviations électrique et magnétique. Guye et Lavanchy consacrent un paragraphe entier à cette partie de l'expérience. Pour réaliser ces mesures de la façon la plus précise possible, ils ont essayé plusieurs méthodes. Au cours de la première partie des mesures, ils mesuraient les déviations à l'aide d'une règle graduée au $1/10^e$ de mm posée sur le cliché. La précision de cette règle leur permettait d'évaluer la position du centre de chaque spot. Ils calculaient ensuite la moyenne de ces mesures ce qui leur donnait la valeur de la double déviation électrique et de la double déviation magnétique.

Dans la seconde partie des mesures, ils ont procédé de façon plus rapide.

> "On tendait le long du cliché deux fins cheveux placés de telle façon que leur distance représentât aussi bien que possible l'ensemble des déterminations enregistrées sur cette plaque photographique. Au moyen de la même règle au $1/10^e$ de mm., on faisait deux lectures de cette distance ; l'une en regard de la première détermination, l'autre en regard de la dernière." [110]

Cette méthode constitue ainsi une moyenne réalisée plus rapidement que la première. D'après les auteurs, elle ne "diminuait pas la précision d'une façon apprécia-

110. Guye et Lavanchy (1916, p. 364-365).

ble"[111]

Avec notre dispositif, nous ne travaillions pas sur un cliché matériel, mais sur l'image enregistrée par l'appareil numérique et visualisée sur un ordinateur. Aussi éloignée que cette façon de procéder soit de la méthode originale, une analogie entre les deux ne semble pas infondée. En effet, les actions à réaliser sont dans les deux cas : enregistrement d'une image, développement de cette image, mesure des déviations.

L'enregistrement et la mesure sont traités dans l'article de Guye et Lavanchy. L'étape intermédiaire n'est en revanche pas mentionnée. Au cours du travail de réplication, cette étape s'est pourtant avérée cruciale puisque les déviations n'étaient pas toujours directement visibles ; un traitement de l'image était nécessaire. Il fallait ajuster le contraste et la luminosité.

Guye et Lavanchy ont-ils également eu à attacher autant d'importance à ce "traitement de l'image" ? Il nous est difficile de répondre à cette question, mais l'expérience nous a appris à ajuster petit à petit le temps de pose selon la luminosité des spots, si bien que sur les dernières mesures, nous n'avons pas eu à procéder à un traitement supplémentaire.

Cette dernière remarque apparaît comme un enseignement important de la *démarche* de réplication : l'une des *conditions de l'expérience* est une grande maîtrise du dispositif par l'expérimentateur. Dans le cas présent, nous avons mis en évidence plusieurs aspects cruciaux : contrôler l'émission en jouant sur le vide et sur l'alimentation haute-tension, et acquérir une connaissance suffisante du dispositif d'enregistrement de l'image pour obtenir des clichés exploitables.

Nous avons acquis ces savoir-faire au cours du maniement du dispositif et ce n'est qu'après beaucoup de temps passé à essayer de régler les différents paramètres, de faire des mesures, de démonter puis remonter et régler à nouveau tout le dispositif, que nous avons pu réaliser une série de mesures exploitables.

4.3.4 Le dispositif reconstruit : synthèse

Le dispositif expérimental que nous avons construit et sur lequel nous avons appris à réaliser des mesures de déviations électrique et magnétique d'un faisceau cathodique de vitesse déterminée comporte des similitudes fortes avec le dispositif mis au point et utilisé par Guye et Lavanchy entre 1913 et 1916. Néanmoins, pour

111. Guye et Lavanchy (1916, p. 365).

diverses raisons évoquées au cours de la description de la reconstruction, nous n'avons pu éviter certains écarts, parfois conséquents.

Nous affirmons cependant que, malgré cette distance entre le dispositif original et sa copie, nous avons atteint une compréhension plus précise du dispositif et de son maniement que si nous en étions restés à l'étude des textes de Guye et Lavanchy.

Nous proposons dans ce paragraphe une synthèse comparative des deux dispositifs.

4.3.4.1 Quelques photos

Voici ci-après quelques photos du dispositif que nous avons reconstruit et sur lequel nous avons travaillé. Ces photos n'ont pas été prises au même moment, mais elles permettent de se rendre compte de l'organisation générale des différents éléments que nous avons décrits séparément jusqu'ici.

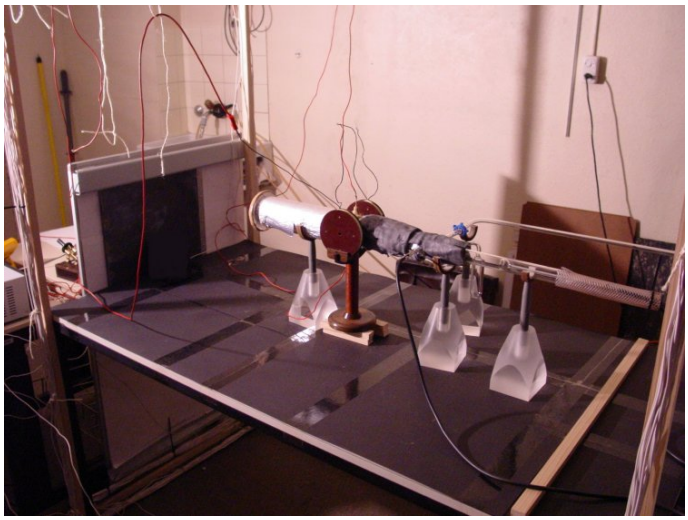

FIGURE 4.24 – Le dispositif reconstruit (1).

4.3.4.2 Comparaison entre le dispositif original et sa copie

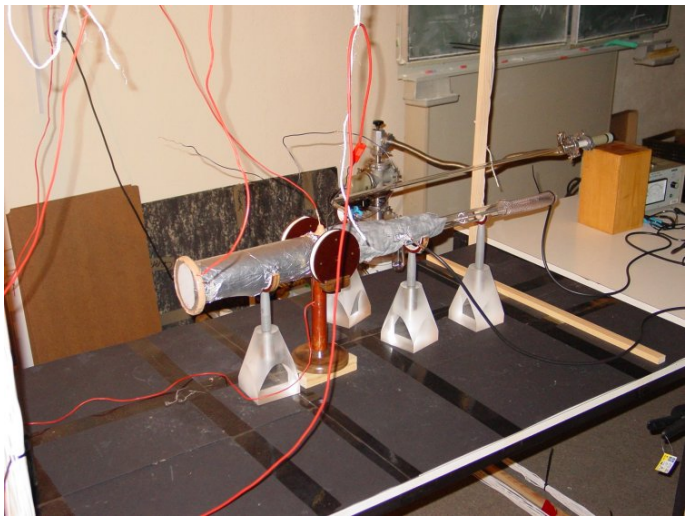

FIGURE 4.25 – Le dispositif reconstruit (2).

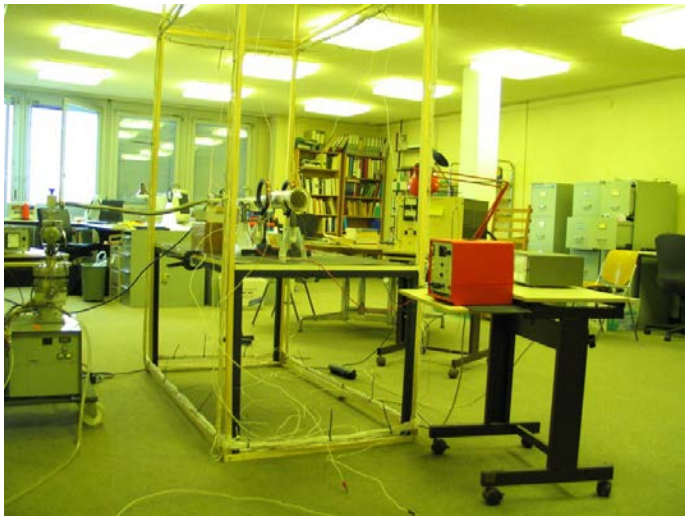

FIGURE 4.26 – Le dispositif reconstruit (3).

Elément du dispositif	**Dispositif original**	**Dispositif reconstruit**	**Observations**
Alimentation	Machine électrostatique 100 kV, 0,5 mA	Générateur de tension 80 kV, 1 mA	Principe de fonctionnement
Pompe à vide	Pompe moléculaire de Gaede	Pompe turbomoléculaire Alcatel	
Tube cathodique	Tube construit au laboratoire de physique	Tube reconstruit	Composition du verre ; traversée verre-métal ; isolation électrostatique
Compensation du champ magnétique terrestre	Enroulements de fils électriques autour de cadres de "grande dimension"	Dispositif reconstruit	reconstruit à partir des photographies et en fonction de la dimension de la table de travail
Déviation électrique	plateaux "cintrés" en laiton disposés dans le tube cathodique	plateaux de forme parabolique en laiton	écartement réglé selon la description originale ; position ajustée suite à l'observation de l'original
Déviation magnétique	bobines de diamètre 8 cm	bobines reconstruites	nombre d'enroulements évalué selon les contraintes d'intensité du courant et l'ordre de grandeur des déviations
à suivre...			

Elément du dispositif *suite*	**Dispositif original** *suite*	**Dispositif reconstruit** *suite*	**Observations** ‘*suite*
Mesure des tensions et courants de déviation	milliampèremètre de Siemens & Halske	multimètres modernes	utilisation de deux multimètres dans le dispositif reconstruit
Dispositif photographiques	appareil modifié spécialement par Guye et Lavanchy	appareil numérique	impossibilité de réaliser plusieurs déterminations sur le même cliché ; “développement” des clichés
Interrupteurs - commutateurs	non décrits	reconstruits selon un modèle retrouvé à l’École de physique	
Mesure des déviations	règle graduée au dixième de millimètre	logiciel informatique	
Connexions électriques	non décrites	fils de connexions et soudures	

TABLE 4.1: Comparaison entre le dispositif original de Guye et Lavanchy et le dispositif reconstruit.

Le tableau comparatif [voir tab. 4.1] résume les principales différences entre les éléments du dispositif original tels que décrits par Guye et Lavanchy et observés et analysés par nous.

4.3.5 Reconstruction de l’activité de mesure

La technique de production des rayons cathodiques maîtrisée dans un domaine de tension allant de 12 à 50 kV environ, et le dispositif reconstruit complètement – malgré les différences avec l’original – nous pouvions procéder à des mesures de

déviation électriques et magnétiques en vue de mesurer la variation de l'inertie des électrons avec la vitesse.

4.3.5.1 Rappels : le protocole expérimental décrit par Guye et Lavanchy

Avant de décrire comment nous avons reconstruit l'activité de mesure de la variation de l'inertie des électrons avec la vitesse, nous revenons sur la méthode des trajectoires identiques et le protocole proposé par Guye et Lavanchy [112].

Tout d'abord, nous rappelons ci-dessous les formules permettant de calculer les vitesses et les masses.

$$\frac{v'}{v} = \frac{V'\ I}{V\ I'}\ \frac{x\ y'}{x'\ y} \tag{4.1}$$

$$\frac{\mu'}{\mu} = \frac{V\ I'^2}{V'\ I^2}\ \frac{x'\ y^2}{x\ y'^2} \tag{4.2}$$

Les grandeurs à mesurer sont donc les déviations sur les clichés, x, y, et l'intensité et la tension de déviation, I et V pour les clichés de comparaison, x', y', I' et V' pour les clichés à des vitesses quelconques. En d'autres termes, les mesures de Guye et Lavanchy sont des comparaisons de déviations pour des faisceaux de différentes vitesses. Les valeurs absolues ne sont obtenues que par la connaissance des valeurs de comparaison.

Les séries de déterminations à différentes vitesses Une fois le faisceau cathodique produit sous une tension fixée, Guye et Lavanchy réalisent, sur une même plaque photographique, plusieurs déterminations, c'est-à-dire l'enregistrement d'une double déviation électrique et d'une double déviation magnétique. Une détermination comporte donc 4 points auxquels vient s'ajouter un point correspondant à l'impact du faisceau non dévié sur l'écran. Chaque cliché comporte entre 10 et 20 déterminations [113]. Les mesures sur ces clichés fournissent les déviations x' et y'.

Au début de la série de déterminations, ils procèdent à une mesure de l'intensité I' du courant qui traverse les bobines et à une mesure de la tension électrique V'

112. Ainsi, nous reprenons volontairement cette partie déjà explicitée auparavant (partie 3.2.2) sous une forme un peu différente. Le lecteur désireux de se concentrer sur les approximations, la démonstration de la méthode se référera à ladite partie.

113. Cette affirmation de Guye et Lavanchy est vérifiée par l'analyse des clichés originaux retrouvés début 2007 dans le compactus du Musée d'Histoire des sciences de Genève. Dans leurs articles, il ne proposent en effet que deux clichés comportant 17 et 18 déterminations chacun. Voir Annexe C.

entre les plateaux du condensateur placé dans le tube. Dans leur dispositif, ces mesures sont des mesures relatives, elles correspondent à la déviation lue sur le milliampèremètre.

Ainsi, à chaque cliché est associé une (double) déviation électrique, une (double) déviation magnétique, une intensité et une tension. L'observation des formules 4.1 et 4.2 montre qu'il manque les valeurs pour le faisceau de comparaison, sans lesquelles il n'est pas possible de calculer les rapports $\frac{v'}{v}$ et $\frac{\mu'}{\mu}$.

Mesures des valeurs de comparaison Ce que nous appelons ici "valeurs de comparaison" fait référence aux valeurs des déviations et des grandeurs électriques mesurées pour un faisceau cathodique dit "de comparaison", ainsi qu'à la vitesse v de ce faisceau. Cette vitesse est calculée à partir de mesures réalisées selon un protocole sécifique.

La vitesse de comparaison Dans un certain nombre de travaux expérimentaux contemporains de ceux de Guye, la vitesse des faisceaux cathodiques est déterminée par la mesure de la tension électrique sous laquelle sont accélérés ces rayons. L'hypothèse sous-jacente est que toute l'énergie fournie par le champ électrique accélérateur est convertie en énergie cinétique.

L'inconvénient notoire de cette façon de procéder est l'impossibilité pratique de mesurer des tensions électriques supérieures à un vingtaine de kV [114].

> "Écartant d'emblée celles qui nécessitent la mesure de très hauts potentiels, nous avons adopté [...] la méthode des *trajectoires identiques* [...]" [115]

Comme nous l'avons montré au chapitre 3, c'est sur ce point précis que Guye s'appuie pour vanter les mérites de la méthode des trajectoires identiques : il n'a pas à mesurer des potentiels trop élevés.

Ainsi, la vitesse de comparaison est une vitesse relativement petite, d'environ $0,22 \times c$ [116], correspondant à un potentiel de décharge de 14 kV environ. Pour autant, Guye et Lavanchy ne se contentent pas de mesurer le potentiel de décharge et d'en déduire directement la valeur de la vitesse de comparaison par la formule 4.3

114. La validité de l'hypothèse d'un transfert d'énergie sans perte a été remise en cause par J.J. Thomson. Des expérimentateurs l'ont démenti par la suite. Voir par exemple les travaux de Jean Malassez en France Malassez (1905) et Malassez (1911), et le travail de August Becker en Allemagne, Becker (1905).
115. Guye et Lavanchy (1916, p. 292).
116. Soit une valeur d'environ 66 000 $km.s^{-1}$.

$$\epsilon U = \frac{1}{2}(\mu)v^2, \tag{4.3}$$

où (μ) représente la "masse cinétique".

En effet, ils proposent de déterminer la vitesse de comparaison par la formule 4.4

$$v = \sqrt{\frac{A}{x}\frac{\epsilon}{\mu_0}\frac{\mu_0}{\mu}V}. \tag{4.4}$$

Les grandeurs x et V sont mesurées directement et la valeur de la charge spécifique est celle mesurée par Classen en 1908, soit $1{,}77.10^7$ CGS. La grandeur notée A est l'intégrale de champ électrique [117] qui est une constante pour une trajectoire donnée [118]. Enfin, le rapport $\frac{\mu_0}{\mu}$ sera déterminé par le calcul.

L'intégrale de champ [119] est calculée grâce à la formule de Schuster [Eq. 4.3] et à celle de la déviation électrique [Eq. 4.5] [120] :

$$x = A\frac{\epsilon V}{\mu v^2} \tag{4.5}$$

$$A = 2\frac{U}{V}\frac{\mu}{(\mu)}x, \tag{4.6}$$

On voit aisément qu'en combinant les équations 4.6 et 4.4, on obtient à nouveau la formule de Schuster. Pourquoi Guye et Lavanchy procèdent-ils en deux étapes alors que, au niveau du calcul, une seule étape suffirait ? Plus précisément, pourquoi ne mesurent-ils pas le potentiel de décharge pour les rayons de comparaison ?

Ils répondent à cette question dans leur article, et nous comprenons mieux leur justification après avoir pris conscience des spécificités expérimentales de l'émission cathodique.

117. Cette intégrale correspond (à la charge électrique près) au travail du champ électrique de déviation le long de *toute* la trajectoire d'un électron.
118. Guye et Lavanchy montrent de plus que pour des trajectoires suffisamment proches, sa valeur ne varie pas de façon appréciable.
119. Notons que la mesure de A ne se fait pas sur les rayons de comparaison. Concrètement, cela signifie que la mesure de A est réalisée pour des rayons cathodiques émis à une certaine vitesse, pour lesquels n'intervient que la déviation électrique, alors que les grandeurs de comparaison sont calculées (pour la vitesse v) et mesurées (pour les déviations x et y et l'intensité I et la tension V) sur des rayons émis à une autre vitesse.
120. La masse qui intervient est ici la masse transverse.

> "Il eut été semble-t-il beaucoup plus pratique de mesurer le potentiel de décharge relatif aux rayons de comparaison eux-mêmes, et de se dispenser d'effectuer la mesure de la constante A, puisque la détermination d'une vitesse revient toujours en définitive à celle des éléments de l'équation :
>
> $$U\epsilon = \tfrac{1}{2}(\mu)v^2$$
>
> Si nous avons choisi cette méthode, c'est qu'elle nous permettait de *séparer les difficultés*. Dans un premier groupe de mesure, nous pouvions vouer tous nos soins à la détermination de U et de V sans avoir à nous préoccuper de maintenir la vitesse v des rayons rigoureusement constante. Nous pouvions entreprendre ensuite le deuxième groupe qui nous donnait la mesures [sic] de x,y, V et I relatifs à la vitesse de comparaison, cette fois sans avoir à lire le potentiel de décharge au tube cathodique." [121]

Ainsi, le protocole d'évaluation des grandeurs de comparaison est guidé par des contraintes d'ordre expérimental. D'une part, il leur faut mesurer de façon précise un potentiel de décharge de 14 kV environ [122], avec une grande précision, tout en enregistrant une double déviation électrique et la tension correspondant. Cette étape constitue une série de mesures à part entière. Et d'autre part, il faut réaliser les déterminations des grandeurs de comparaison qui interviennent dans les formules 4.1 et 4.2, qui servent aussi à calculer la vitesse de comparaison v par la formule 4.4. Cette mesure doit se faire sous un potentiel de décharge "rigoureusement" constant, ce qui nécessite, comme nous l'avons compris, toute l'attention des expérimentateurs.

Retour sur le calcul de A : la technique d'approximations successives
L'équation 4.6 permet de calculer A. Les grandeurs nécessaires sont le potentiel de décharge U, la tension de déviation V et la valeur de la double déviation électrique x. Mais il faut également connaître le rapport de la masse transverse à la masse cinétique à la vitesse des rayons pour lesquels est calculée l'intégrale de champ électrique. Pour cela, Guye et Lavanchy travaillent par approximations successives, à partir de la formule de Schuster.

Ils calculent la vitesse des rayons produits sous le potentiel U par la formule suivante :

$$v = \sqrt{2U\frac{\epsilon}{(\mu)}}, \tag{4.7}$$

121. Guye et Lavanchy (1916, p. 373, souligné par nous).
122. Les potentiels sous lesquels sont produits les rayons qui servent à déterminer l'intégrale de champ électrique sont compris entre 13130 et 14070 V, Guye et Lavanchy (1916, p. 372).

qu'ils récrivent comme

$$v = \sqrt{2U \frac{\epsilon}{\mu_0} \frac{\mu_0}{(\mu)}}. \tag{4.8}$$

C'est à partir de cette équation qu'ils entament un processus d'approximations successives :

> "En faisant $\frac{\mu_0}{(\mu)} = 1$ dans [l'équation 4.8] on obtenait une première valeur de v qui nous permettait de calculer celle du rapport $\frac{\mu_0}{(\mu)}$ correspondant. Introduisant cette dernière dans la même équation [4.8], on calculait une nouvelle valeur plus approchée de v, puis de nouveau $\frac{\mu_0}{(\mu)}$. On pouvait ainsi déterminer cette vitesse v, donc aussi le rapport $\frac{\mu_0}{(\mu)}$ *pour chacune des deux hypothèses* avec toute la précision que l'on désirait."[123]

Ainsi, une fois qu'ils ont calculé la vitesse v des rayons, ils peuvent "pour chacune des deux hypothèses" calculer la valeur du rapport de la masse transverse à la masse cinétique. Combinée aux valeurs mesurées du potentiel de décharge U, de la tension de déviation V et de la double déviation électrique x, ils en déduisent deux valeurs pour l'intégrale de champ A, l'une dans l'hypothèse d'Abraham, l'autre dans l'hypothèse de Lorentz-Einstein.

Valeur de la vitesse de comparaison Dans l'expression de la vitesse de comparaison intervient le rapport $\frac{\mu_0}{\mu}$. Son calcul est à nouveau mené par approximations successives, de la même manière que dans le calcul de A.

La vitesse de comparaison peut donc être calculée par la formule 4.4, au moyen des grandeurs mesurées et des valeurs calculées sur les rayons de comparaison.

Conditions expérimentales Comme nous l'avons précisé plus haut, la mesure de A et celle de v ne sont pas menées pour les mêmes rayons. Concrètement, ces mesures sont menées de la façon suivante.

La mesure de A repose pour l'essentiel sur la mesure du potentiel de décharge grâce à l'électromètre mis au point par Guye et Tscherniawsky entre 1910 et 1913. Guye et Lavanchy précisent que cette mesure doit être effectuée rapidement, puisqu'il

123. Lavanchy (1917, p. 36, souligné par nous). Dans l'article publié par Guye et Lavanchy en 1916, ce passage comporte une erreur dans l'expression de la vitesse. Cette erreur est rectifiée dans la thèse de Lavanchy publiée en 1917. C'est ce passage corrigé qui est repris dans le Mémoire de Guye en 1921.

est nécessaire de réaliser de façon simultanée l'enregistrement d'une double déviation électrique correspondant au potentiel de décharge mesuré.

La mesure de la vitesse de comparaison, ainsi que celle des autres grandeurs de comparaison, repose en majeure partie sur la possibilité de travailler sur des rayons de vitesse aussi constante que possible.

> "Toute l'attention pouvait être portée sur le réglage du fonctionnement même du tube de façon à obtenir pendant toutes les mesures des rayons homogènes, de vitesse aussi constante que possible." [124]

Ils réalisent de plus un grand nombre de mesures, afin d'"élimine[r] presque totalement les erreurs fortuites, dont la principale résulte toujours de l'instabilité de l'émission cathodique" [125]. Ainsi, ils enregistrent au début de l'expérience 39 séries de 4 déterminations, et à la fin 17 séries. Le principe est le même que pour les séries de déterminations à des vitesses quelconques. Les doubles déviations électriques et magnétiques sont évaluées sur les clichés, soit à la règle au $1/10^e$ de mm, soit par le "procédé du cheveu tendu" [126]. Les mesures de l'intensité et de la tension de déviation sont effectuées au début et à la fin de chaque série de déterminations.

Calcul des couples (masse,vitesse) La vitesse des rayons de comparaison et les grandeurs de comparaison x, y, V et I étant déterminées, les rapports $\frac{v'}{v}$ et $\frac{\mu'}{\mu}$ peuvent s'écrire

$$\frac{v'}{v} = [\frac{V'y'}{I'x'}]\ [\frac{Ix}{Vy}] \tag{4.9}$$

et

$$\frac{\mu'}{\mu} = [\frac{I'^2x'}{V'y'^2}]\ [\frac{Vy^2}{I^2x}]. \tag{4.10}$$

Guye et Lavanchy les écrivent sous la forme suivante [127] :

$$\beta' = [\beta\frac{Ix}{Vy}]\ \frac{V'y'}{I'x'} \tag{4.11}$$

124. Guye et Lavanchy (1916, p. 372-373).
125. Guye et Lavanchy (1916, p. 373).
126. Guye (1921, p. 339).
127. β est le rapport de la vitesse des rayons à celle de la lumière et μ_0 est la masse au repos de l'électron.

$$\frac{\mu'}{\mu_0} = [\frac{\mu}{\mu_0}\frac{Vy^2}{I^2x}]\ \frac{I'^2x'}{V'y'^2}. \tag{4.12}$$

Les termes entre crochets sont déterminés pour les rayons de comparaison, de vitesse v, ou, rapportée à celle de la lumière, de vitesse β. Le rapport $\frac{\mu}{\mu_0}$ est calculé pour la vitesse de comparaison, en fonction de l'hypothèse à vérifier.

En résumé, les couples (masse,vitesse) sont obtenus par les mesures effectuées sur les rayons de comparaison qui dépendent de l'hypothèse choisie pour la variation de l'inertie avec la vitesse, ainsi que par les mesures effectuées sur les rayons de vitesse quelconque qui ne dépendent pas de cette hypothèse.

Guye et Lavanchy ont réalisé 150 séries de déterminations pour des vitesses comprises entre 0,25 c et 0,49 c.

4.3.5.2 Première tentative de mesures : mise en évidence de certaines difficultés

Notre première tentative de mesure de la variation de l'inertie des électrons avec la vitesse a été réalisée au printemps 2006. Nous avons appris à utiliser le dispositif reconstruit et cela nous a permis de mettre en évidence certaines difficultés liées à la mesure de la vitesse de comparaison. Les résultats obtenus alors s'écartaient sensiblement de la formule de Lorentz-Einstein et semblaient à première vue en accord avec la formule d'Abraham. L'analyse de ces résultats a montré toute l'importance d'une mesure précise de la vitesse de comparaison [128].

Au cours de cette première tentative, la couche de tungstate de calcium qui compose l'écran fluorescent n'avait pas été déposée par sédimentation. Avec des rayons de vitesse assez grande, produits sous des potentiels de décharge supérieurs à 30 kV, la visualisation des spots et leur enregistrement ne présentaient pas de difficulté majeure. Après quelques essais, nous avons trouvé le bon réglage de l'appareil, une durée d'exposition convenable et nous avons pu organiser la disposition des différents éléments de façon à pouvoir manipuler dans l'obscurité assez rapidement.

C'est à ce moment, alors que nous manipulions le dispositif complet pour la première fois, que nous avons été vraiment confronté à ce que nous appelons l'*activité de mesure*. Forts des savoir-faire acquis en cherchant à stabiliser l'émission cathodique, nous pouvions obtenir des rayons stables pendant un temps suffisant pour

128. Voir §3.3.4.3.

enregistrer entre 5 et 10 déterminations, soit entre 50 secondes et un peu moins de 2 minutes[129].

Les conditions nécessaires au bon fonctionnement du dispositif étaient les suivantes. En premier lieu, le tube était préparé pendant quelques jours avant son utilisation. Tout d'abord, les parois internes étaient nettoyées avec précaution. Ensuite, le tube était fermé et l'étanchéité vérifiée. Enfin, nous laissions la pompe à vide en marche durant tout ce temps de préparation, afin que les parois internes en verre et en métal soient suffisamment dégazées. Alors, la pression dans le tube se situait aux alentours de 10^{-6} mm de mercure.

A de telles pressions, il n'était bien sûr pas possible de produire un faisceau sous une tension inférieure à 50 kV. Nous devions encore laisser la pression dans le tube remonter sous l'effet du dégazage, lent mais inévitable. Il devenait alors possible de procéder à l'émission cathodique et donc aux mesures des déviations.

Qu'avons-nous appris au cours de cette première tentative de prise de mesures ? Tout d'abord, notre compréhension empirique de l'émission s'en est trouvée renforcée. En effet, il ne s'agissait pas simplement de produire un faisceau, mais plutôt de produire un faisceau dont l'impact sur l'écran devait être visible et stable le plus longtemps possible. Nous avons vu comment l'émission pouvait s'emballer et comment l'utilisation d'un écran au tungstate de calcium avait permis d'augmenter le temps pendant lequel nous pouvions observer un spot au paragraphe 4.2.3.2. Une fois la pompe arrêtée, il fallait trouver la tension la plus faible sous laquelle l'émission donnait un spot visible sur l'écran.

L'utilisation de l'appareil photographique ajoutait une difficulté supplémentaire en ce sens que le critère n'était plus simplement la visibilité à l'œil nu, mais une luminosité suffisante pour être enregistrée par l'appareil. Ce n'est qu'après de nombreux essais infructueux que nous avons appris à quel moment commencer l'enregistrement des déterminations, et que nous avons pu trouver la durée d'exposition suffisante. Ces essais infructueux se traduisaient par des clichés noirs, sans aucun spot visible même après traitement.

Ce savoir-faire expérimental devait être poussé le plus loin possible, car comme le disent Guye et Lavanchy, et comme nous l'avons nous-même constaté, l'émission ne peut être complètement stabilisée. Ainsi, alors que tout pouvait sembler fonctionner correctement, il arrivait que l'emballement soit précipité par une étincelle un peu

129. Nous avons dit plus haut comment le fonctionnement de l'appareil numérique nous empêchait d'en réaliser plus.

trop forte, ou que l'émission cesse pendant un temps suite à une baisse de pression dans le tube. Si cela se produisait trop vite, la série de déterminations était à reprendre entièrement car nous n'avions alors pas suffisamment de clichés. Il était donc nécessaire de "connaître" suffisamment le fonctionnement du tube, mais également de procéder à des déterminations rapides, afin d'en enregistrer suffisamment en un temps le plus court possible.

Au bout d'un certain temps nous avions acquis suffisamment de maîtrise pour réaliser des séries d'environ 8 déterminations toutes exploitables, pour des tensions comprises entre 30 kV et 50 kV. Au delà, nous ne parvenions pas à maintenir l'émission du fait d'étincelles trop fréquentes. Mais, plus surprenant, en essayant de mesurer la vitesse de comparaison, c'est-à-dire sous des potentiels plus faibles de l'ordre de 14 kV, nous étions confronté à une difficulté non évoquée par Guye et Lavanchy.

Produire des rayons cathodiques sous une tension faible nécessite une pression suffisante dans le tube. Nous avons nettement constaté que cela avait pour effet de diminuer la stabilité de l'émission, ou plutôt d'en augmenter la vitesse d'emballement. Ainsi, le nombre de déterminations successives que nous parvenions à enregistrer était toujours inférieur à 3. De plus, les spots n'étaient visibles que pour des intensités électroniques relativement importantes, ce qui accentuait encore cet effet. Enfin, ils n'étaient pas nettement définis, si bien que la mesure des déviations était rendue très imprécise.

Rappelons que Guye et Lavanchy affirment :

> "Quant aux valeurs des vitesses de comparaison [...], elles résultent également d'un très grand nombre de mesures faites dans des conditions expérimentales *particulièrement faciles et favorables* puisqu'il s'agissait de rayons cathodiques lents [...]" [130]

Ils ajoutent :

> "Cet ensemble de déterminations était effectué sans apporter de modification au fonctionnement de la machine statique et sans faire agir la pompe de Gaede [...]" [131]

Or, ils réalisent jusqu'à 17 séries de 4 déterminations chacune pour mesurer la vitesse de comparaison. Avec notre dispositif, il était pour l'heure impossible de

130. Guye et Lavanchy (1916, p. 442, nous soulignons).
131. Guye et Lavanchy (1916, p. 363).

réaliser autant de mesures. Nous avons toutefois choisi de traiter le problème de la définition des spots avant celui de la stabilité de l'émission, que nous pensions pouvoir résoudre par l'expérience.

Il apparaissait assez évident que le problème venait de la déposition de la couche de tungstate de calcium sur l'écran. La forme des spots montrait la non-uniformité de la répartition de la poudre fluorescente. L'impossibilité de les observer à des intensités faibles montrait la trop grande épaisseur de cette couche. Nous avons donc décidé de remédier en premier lieu au problème de réalisation de l'écran, ce que nous sommes finalement parvenus à faire par la technique de déposition par sédimentation de la poudre fine de tungstate de calcium.

Les figures 4.27 à 4.30 montrent les déterminations que nous avons enregistrées pour la détermination de l'intégrale de champ électrique A [fig. 4.27 et 4.28] et pour la détermination des grandeurs de comparaison [fig. 4.29 et 4.30].

Sur celles-ci, les spots sont mal définis et de taille trop importante.

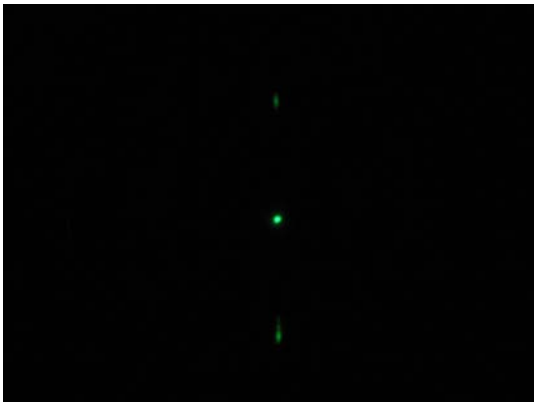

FIGURE 4.27 – Enregistrement d'une double déviation électrique ayant servi à la détermination de l'intégrale de champ électrique A, au cours de notre première tentative de mesure (1).

Malgré ces difficultés, nous avons exploité ces clichés et les mesures effectuées. Ceci nous permettait de commencer à étudier le traitement des données issues de la mesure, et de voir si nos mesures s'écartaient franchement ou non des résultats attendus. Le graphique 4.31 résume ces résultats, obtenus sur 16 séries de déterminations.

Nous n'avons pas fait figurer sur ce graphique les barres d'incertitudes [132] afin

132. Il n'y en a d'ailleurs pas sur les graphiques proposés par Guye et Lavanchy.

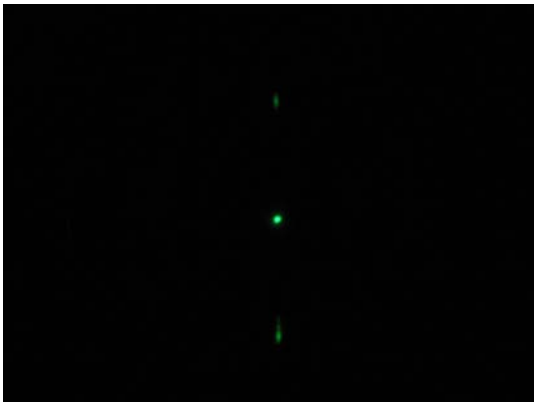

FIGURE 4.28 – Enregistrement d'une double déviation électrique ayant servi à la détermination de l'intégrale de champ électrique A, au cours de notre première tentative de mesure (2).

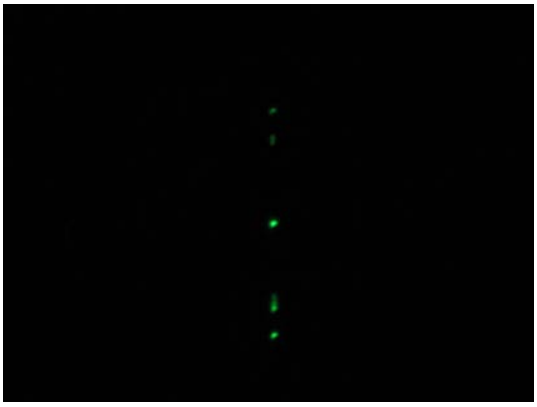

FIGURE 4.29 – Une première détermination enregistrée pour les rayons de comparaison au cours de notre première tentative de mesure.

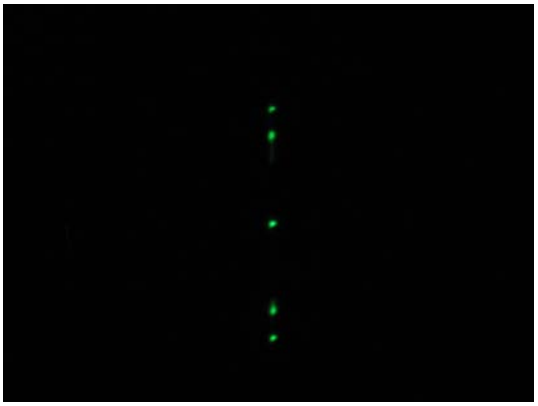

FIGURE 4.30 – Une seconde détermination enregistrée pour les rayons de comparaison au cours de notre première tentative de mesure.

de rendre les points de mesure plus visibles. L'erreur relative sur la vitesse est de 10 % environ et sur la masse, elle est de 8 % environ. Les sources de ces erreurs sont principalement les incertitudes sur la position des spots et donc sur les mesures des déviations, ainsi que la difficulté à mesurer le potentiel de décharge de façon précise.

Guye et Lavanchy ont eu recours à un appareil spécialement conçu pour réaliser cette mesure, l'électromètre sous pression mis au point avec Tscherniawsky. Nous avons réalisé cette mesure en branchant en dérivation sur le tube cathodique une résistance de 30 $M\Omega$ et en mesurant l'intensité du courant qui la traverse. Cette mesure était rendue difficile du fait de la résistance placée en série entre le tube cathodique et l'alimentation haute tension, qui servait à stabiliser le faisceau. En effet, si l'intensité électronique variait trop, la tension aux bornes du tube variait également. Il fallait donc travailler sur des rayons stables, ce que nous n'avons pas vraiment pu réaliser au cours de cette première tentative de mesure. Finalement, la mesure du potentiel de décharge a été faite avec une incertitude évaluée à environ 5 %.

Ainsi, malgré les difficultés et les résultats obtenus, la première tentative de mesure s'est révélée instructive du point de vue de la réplication. Nous avons appris à manipuler le dispositif complet dans le but de réaliser les mesures de déviation, et nous avons également mis à jour les difficultés liées à la mesure *cruciale* des grandeurs de comparaison.

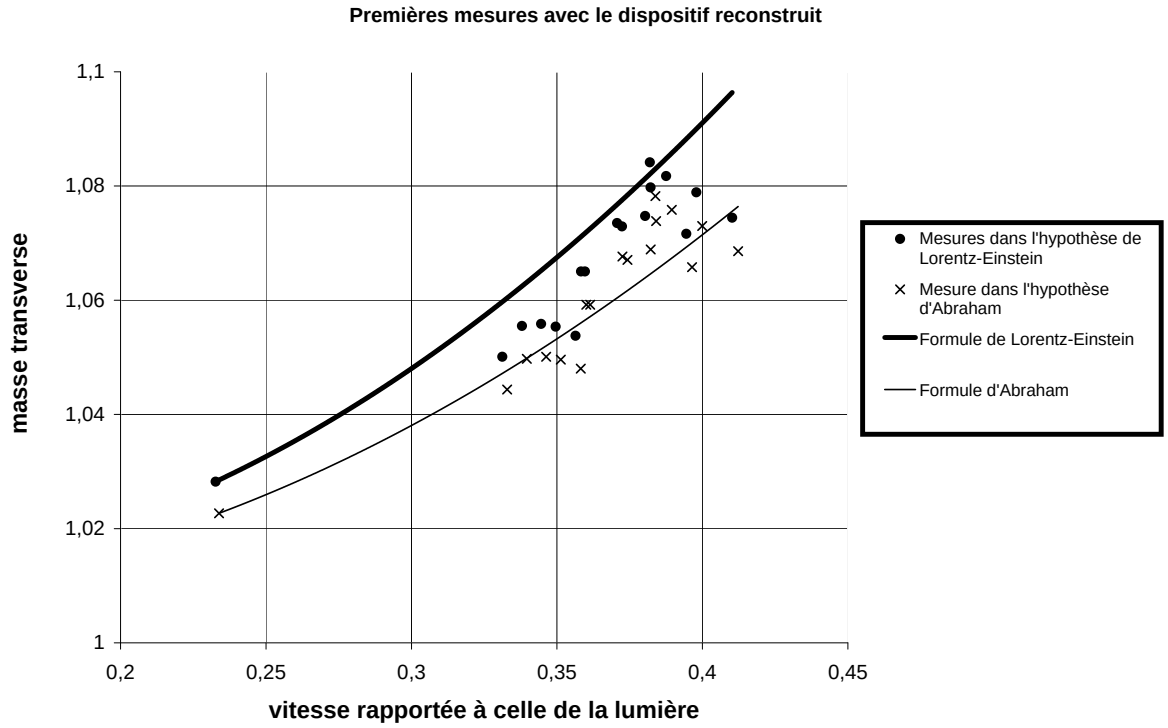

FIGURE 4.31 – Graphique résumant les premiers résultats de mesure, obtenu pour 16 séries de déterminations. Rappelons que les "points" sont à comparés à la courbe pour une hypothèse donnée. Autrement dit, les croix (Abraham) sont à comparés à la formule d'Abraham et les ronds à celle de Lorentz-Einstein.

4.3.5.3 Deuxième série de mesures : réalisation de mesures systématiques

Amélioration de la qualité du vide Après la première tentative de mesure de la variation de l'inertie en fonction de la vitesse, certaines parties du dispositif, certains aspects de son fonctionnement, devaient être travaillés à nouveau.

L'écran au tungstate de calcium a ainsi fait l'objet de toute notre attention. Nous avons procédé à plusieurs essais avant d'obtenir une déposition convenable. Au cours de ces essais, nous manipulions toujours le tube, car pour juger de la qualité de l'écran, il nous fallait observer la fluorescence produite par celui-ci. Une autre question se posait également qui était celle de la fixation de l'écran sur le tube, et, de façon plus générale celle de l'étanchéité du tube à cet endroit. En cette période estivale, la chaleur rendait la graisse utilisée pour sceller le tube trop fluide. Nous sommes alors revenus à la technique utilisée par Guye et Lavanchy : utiliser la cire à cacheter pour fixer l'écran au tube. Une fois l'écran correctement fixé au tube, ce dernier n'a plus été touché pendant quelques mois [133]. Nous avons alors profité de ce temps pour faire fonctionner la pompe à vide intensément.

Quand notre attention s'est de nouveau portée sur la réalisation de mesures, nous avons constaté une nette amélioration de la qualité du vide, qu'une dernière opération de démontage n'a pas dégradée car nous prenions alors le plus grand soin pour ne pas "salir" l'intérieur du tube.

La série de mesures Le dispositif n'a que très peu évolué entre les deux séries de mesures puisque seul l'écran a été amélioré. En revanche, la qualité du vide a été nettement augmentée, ainsi que notre savoir-faire relatif à l'utilisation du dispositif.

Cette deuxième série de mesures s'est révélée de meilleure qualité que la première. Les 44 séries de déterminations que nous avons réalisées comportaient généralement entre 10 et 15 déterminations. Le domaine de vitesse dans lequel nous avons travaillé s'est étendu de 26 % à 42 % de la vitesse de la lumière, soit des potentiels de décharge allant de 20 à 48 kV. Guye et Lavanchy ont quant à eux réalisé 150 séries d'environ 15 déterminations chacune, entre 25 et 49 % de la vitesse de la lumière, soit pour des potentiels de décharges allant de 20 à 80 kV. Sur le même domaine de vitesse que le nôtre, ils ont réalisé environ 100 séries de déterminations.

133. En effet, nous avons alors consacré notre temps à la remise en état de marche de la machine électrostatique de Töpler.

Nous avons souligné l'importance cruciale de la mesure difficile des valeurs de comparaison. Au cours de cette série de mesures, ce point a été nettement amélioré. L'intégrale de champ électrique A a été mesurée à huit reprises et la vitesse de comparaison a été déterminée sur une ensemble de 20 séries de 4 déterminations. Guye et Lavanchy ont mesuré ces grandeurs à deux reprises, au tout début puis à la fin des séries de mesures. Ils ont mesuré A respectivement 8 et 6 fois, et la vitesse de comparaison 40 et 17 fois.

Ainsi, en ce qui concerne ces grandeurs, nos mesures sont, en quantité, comparables à celles de Guye et Lavanchy.

La mesure du potentiel de décharge, qui intervient dans la détermination de l'intégrale de champ électrique, a été réalisée de la même manière que la première fois, en mesurant l'intensité du courant dans une résistance placée en dérivation sur le tube cathodique[134]. La mise en œuvre de cette mesure a été rendue plus aisée par l'habitude que nous avions du dispositif, mais également par l'amélioration de la qualité du vide et de la déposition de tungstate de calcium. Le faisceau de faible vitesse était en effet plus stable et mieux défini, et nous savions comment régler la pression dans le tube pour qu'il en soit ainsi.

Les grandeurs de comparaison sont, comme nous l'avons rappelé plus haut, mesurées sur des séries de détermination réalisées pour un potentiel de décharge relativement faible. Contrairement à la mesure de A, il faut cette fois maintenir ce potentiel et donc la vitesse des électrons la plus constante possible tout au long de la mesure. Il ne nous a pas été possible de maintenir cette vitesse constante suffisamment longtemps pour réaliser un nombre élevé de séries de déterminations, du fait de la remontée de la pression dans le tube. Ainsi, après chaque série de 4 déterminations, avant et après lesquelles nous mesurions les intensités et tensions de déviations, nous rouvrions la vanne entre la pompe et le tube afin de diminuer la pression et de pouvoir poursuivre les mesures sans toucher à l'alimentation haute tension.

Guye et Lavanchy ne parlent pas de ce problème. Ils ne précisent pas si la pression remontait au cours de leur mesure de la vitesse de comparaison. Ils affirment même que la pompe ne fonctionnait pas au cours de ces mesures. Notre expérience avec le dispositif reconstruit tend cependant à nous faire penser qu'il est impossible de maintenir l'émission cathodique aussi longtemps sans intervention de l'expérimenta-

134. La valeur de cette résistance était de 19,86 $M\Omega$, mesuré à 0,53 %. La valeur du courant était mesurée à 0,3 %. Ceci donnait pour la mesure du potentiel de décharge une précision de 0,61 %. Guye et Lavanchy annoncent une précision de 0,66 %.

teur. Il faut en effet environ 30 minutes pour réaliser 40 séries de 4 déterminations dans le dispositif de Guye et Lavanchy.

Le tableau ci-dessous propose une comparaison entre les mesures de Guye et Lavanchy et les nôtres, pour les valeurs de comparaison.

	Mesures de Guye et Lavanchy	**Nos mesures**
$A_{Lorentz-Einstein}$	6890	5738
$\beta_{Lorentz-Einstein}$	0,2277	0,2385
$A_{Abraham}$	6900	5755
$\beta_{Abraham}$	0,2281	0,2392

TABLE 4.2: Mesures de l'intégrale de champ électrique et de la vitesse de comparaison.

La différence entre les vitesses de comparaison. Elle montre simplement que nous avons travaillé avec un potentiel de décharge légèrement différent. En revanche, la comparaison entre les intégrales de champ électrique montre une différence assez conséquente.

Afin de nous assurer que cet écart ne venait pas d'une erreur de mesure, nous avons réalisé un programme de calcul permettant de déterminer l'intégrale de champ électrique. Nous avons trouvé une valeur très proche de celle mesurée. Ainsi, la différence avec la valeur de Guye et Lavanchy vient d'une différence de géométrie dans le dispositif de déviation électrique. Pour être plus précis, il apparaît, d'après les calculs, que les plateaux à l'intérieur du tube, que nous ne pouvions observer directement et dont Guye et Lavanchy ne précisaient pas la position exacte, sont décalés d'1 cm environ vers l'écran dans notre tube par rapport à l'original.

Cet écart à la géométrie originale n'est pas crucial dans la réalisation des mesures ou le bon fonctionnement du tube. Cela signifie seulement que pour une même valeur de la déviation électrique, nous utilisons un potentiel plus élevé.

Les séries de déterminations ont été effectuées après la mesure de l'intégrale de champ électrique et de la vitesse de comparaison. Dans le domaine de tension utilisée, nous étions déjà parvenu à réaliser des déterminations au cours de la première

tentative. Cette fois, ces mesures ont été plus aisées du fait de la meilleure qualité du vide, même si un phénomène nouveau est alors apparu.

Nous avons déjà souligné le phénomène de diminution de la pression due au passage du faisceau cathodique dans le tube [135]. Il s'agit d'un phénomène dont nous n'avions jusque là pas eu à nous soucier. À l'occasion de la deuxième campagne de mesures, nous y avons été confronté pour la première fois.

Une fois la pression et la tension entre les électrodes réglées, un spot était visible sur l'écran. Mais, assez vite, le spot disparaissait, du fait d'une diminution de la pression. Il nous fallait alors augmenter la tension appliquée entre les électrodes pour le voir à nouveau. Après quelques manipulations, il était possible de retrouver un spot visible suffisamment longtemps pour procéder aux déterminations. Il est particulièrement intéressant de noter à ce sujet que nous n'avions pas de régulateur de pression pour résoudre ces problèmes de "dureté" du tube cathodique.

Après avoir apprivoisé ce phénomène, nous avons constaté que nous pouvions réaliser l'enregistrement d'un plus grand nombre de déterminations que lors de nos premiers essais.

Nos résultats Finalement, nous avons calculé pour les différentes vitesses utilisées la variation de l'inertie. Les graphiques 4.32 et 4.33 résument les 44 séries de déterminations effectuées au cours de la deuxième campagne de mesure.

Afin de ne pas nuire à la lisibilité des graphiques, nous n'avons pas fait figurer les barres d'incertitude. Le calcul montre une incertitude relative de 3,5 % sur la mesure de la vitesse et de 4,4 % sur la masse transversale. Ces valeurs sont trop importantes pour pouvoir distinguer les formules de Lorentz-Einstein et d'Abraham, et donc pour pouvoir "vérifier" la première. On observe également une dispersion des mesures assez importante.

Ainsi, à l'issue de notre travail expérimental, nous n'avons pas réussi à tirer une conclusion scientifique à la question posée par Guye et Lavanchy.

Quelques clichés réalisés lors de la deuxième série de mesures Nous donnons pour compléter quelques clichés pris au cours de la seconde campagne de mesure.

Nous voyons que les déterminations conduisant à la mesure des grandeurs de

135. Voir note 66.

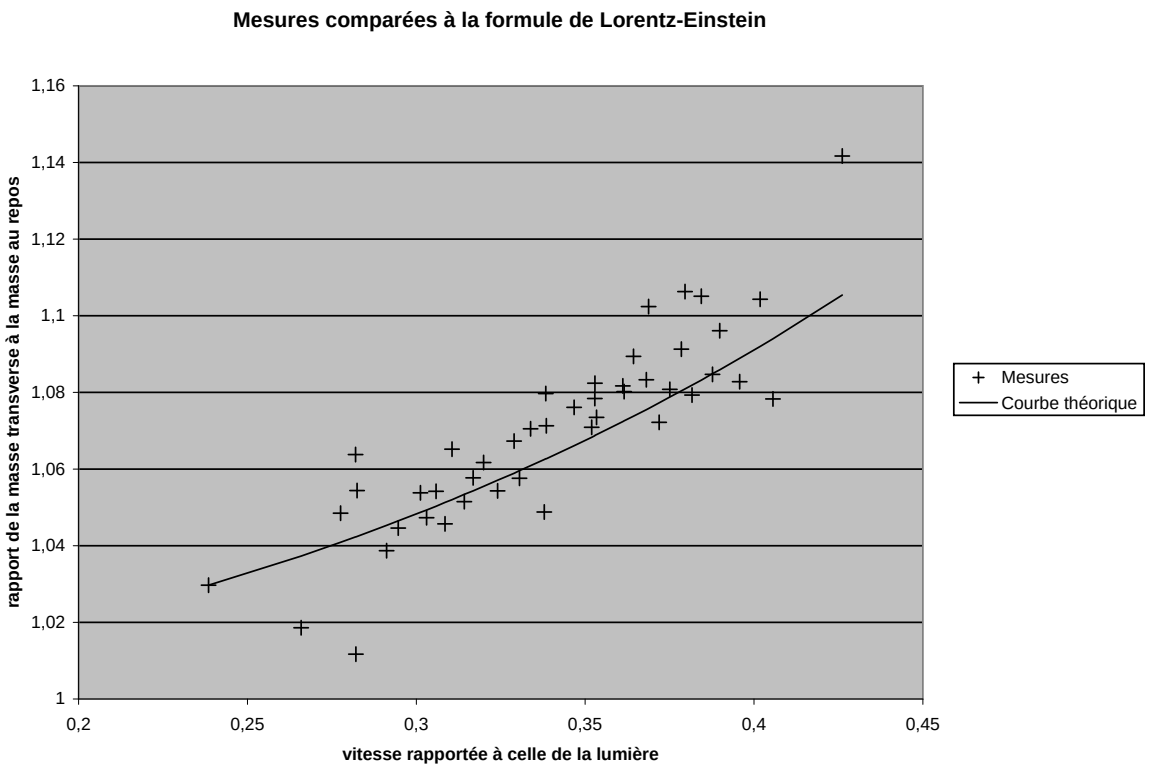

FIGURE 4.32 – Graphique résumant les résultats de mesure, obtenu pour 44 séries de déterminations, comparés à la formule de Lorentz-Einstein.

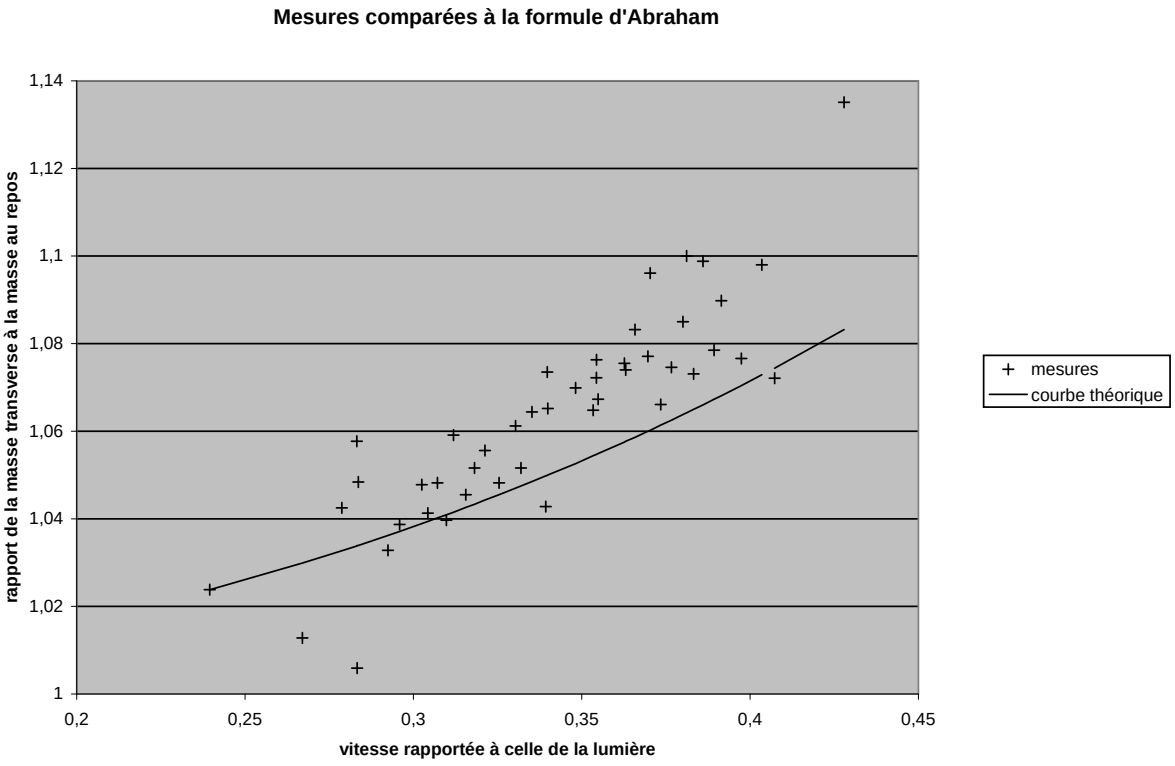

FIGURE 4.33 – Graphique résumant les résultats de mesure, obtenu pour 44 séries de déterminations, comparés à la formule d'Abraham.

comparaison sont beaucoup mieux définies que lors de la première campagne de mesure. Quant aux déterminations sur les rayons de grande vitesse, les spots sont mieux définis, mais c'est surtout la possibilité d'en enregistrer un plus grand nombre, grâce à l'amélioration de la qualité du vide, qui constitue un mieux par rapport aux précédentes séries.

FIGURE 4.34 – Double-déviation électrique ayant servi à la mesure de l'intégrale de champ électrique A. $x = 45{,}45\ mm$; $V = 220\ V$; $U = 14065\ V$; $A = 5726\ mm^{-1}$

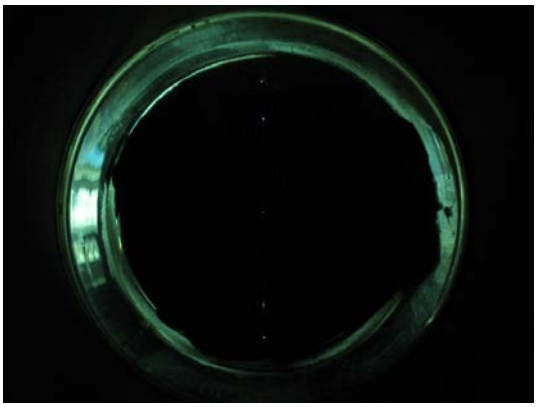

FIGURE 4.35 – Détermination effectuée sur les rayons de comparaison. $x = 48{,}1\ mm$; $y = 66{,}4\ mm$; $V = 249{,}4\ V$; $I = 0{,}228\ A$; $\beta = 0{,}2383$

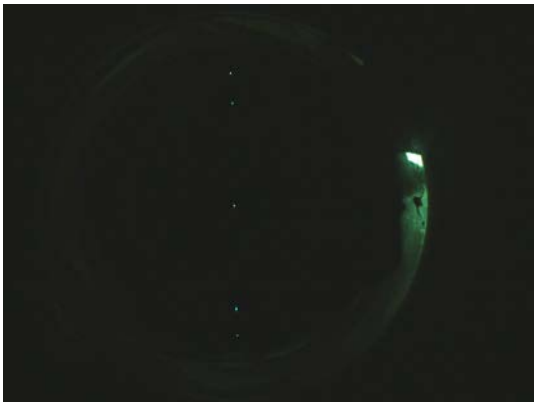

FIGURE 4.36 – Détermination effectuée sur des rayons de vitesse $\beta = 0{,}3785$. $x = 53{,}9\ mm$; $y = 68{,}7\ mm$; $V = 745\ V$; $I = 0{,}402\ A$; $\frac{\mu'}{\mu_0}_{calcul} = 1{,}0888$; $\frac{\mu'}{\mu_0}_{theorique} = 1{,}0804$.

Conclusion

Quelle analyse devons-nous faire du travail de réplication que nous avons entrepris ? D'un point de vue que nous qualifierions de "scientifique", l'objectif aurait dû être de vérifier la formule de Lorentz-Einstein avec un dispositif reconstruit selon l'original. Alors, notre travail doit être considéré comme un échec. Nous n'avons pas réussi à réaliser des mesures avec une précision suffisante et nous n'avons pas non plus réussi à travailler avec des tensions aussi élevées que celles utilisées par Guye et Lavanchy. D'un point de vue "historique", la question s'avère selon nous plus ardue.

Bien que nous n'ayons effectué des mesures dans un domaine de vitesses relativement limité et en tout cas inférieur à l'original, le travail réalisé pour obtenir un bon fonctionnement du tube jusque 50 kV nous a permis d'envisager l'expérience dans sa globalité, comme interaction entre différentes parties qui auraient pu paraître déconnectées. L'expérience de Guye et Lavanchy s'est avérée être une expérience complexe, faisant appel à de nombreux savoir-faire en partie oubliés. Les rayons cathodiques sont produits dans un tube à décharge relié à une pompe à vide et à une machine électrostatique, deux appareils associés à des savoir-faire techniques très particuliers. Les rayons sont alors déviés par des champs électrique et magnétique produits respectivement par un condensateur inséré dans le tube et des bobines placées autour de celui-ci. Ces deux dispositifs sont alimentés par des sources réalisées par une association de piles et d'accumulateurs en grande quantité. Enfin, le dispositif de mesure se décompose en deux. D'une part la mesure de la tension et du courant de déviation

est effectuée à l'aide d'un milliampèremètre de précision. D'autre part, les déviations sont enregistrées par un appareil photographique et mesurées sur les clichés.

Réaliser l'expérience de vérification de la formule de Lorentz-Einstein comme Guye et Lavanchy revient donc, finalement, à maîtriser chacune de ces trois étapes, en interaction avec les deux autres. Mais cela nécessite en premier lieu de construire, reconstruire, rénover, réutiliser tous ces instruments. Pour enfin reconstruire l'expérience, c'est-à-dire le dispositif *et* l'activité de mesure, il faut apprendre voire redécouvrir les savoir-faire liés à l'utilisation des instruments et à la production et l'observation des phénomènes physiques en jeu.

Parce que nous pressentions cette complexité [136], nous avons fait le choix de d'abord concentrer notre attention sur le tube cathodique dont nous avons construit une copie aussi proche que possible de l'original. L'interaction entre des sources historiques de natures différentes s'est avérée nécessaire pour mener à bien cette reconstruction. Les tubes originaux ont été observés avec l'aide cruciale de personnes expertes en mécanique et en verrerie. Cela a permis de décrypter les descriptions originales plutôt destinées à montrer à une communauté scientifique spécifique l'attention portée à la réalisation d'un tube cathodique le mieux adapté possible à l'objectif général de l'expérience, qu'à décrire ce tube de façon précise.

Nous avons ensuite appris à produire des rayons cathodiques avec ce tube relié à une alimentation haute-tension et une pompe à vide modernes. À nouveau, nous avons pris le parti de procéder pas à pas, d'éviter de nous confronter à de trop nombreuses difficultés. Ainsi, l'apprentissage de la technique de production de rayons cathodiques s'est fait dans des conditions matérielles assez éloignées des conditions historiques. Cependant le temps passé à essayer de produire des rayons cathodiques avec un tube "copie" a été instructif à de nombreux égards. Pas à pas, nous nous sommes familiarisé avec ce tube et les phénomènes dont il est le siège. Après de longs tâtonnements, nous avons réussi à obtenir ce que nous avons identifié comme étant le rayonnement cathodique. Revenant alors à la littérature contemporaine de Guye et à ses articles, nous avons mis en évidence une problématique expérimentale fondamentale de cette expérience : la production et la maîtrise de l'émission cathodique. Nous présentons une étude originale sur ce sujet dans la partie suivante.

Par la suite, nous avons pu mener à bien — plus ou moins — deux campagnes de mesures de la variation de l'inertie avec la vitesse. Nous sommes ainsi entrés au cœur

136. Le nombre important d'instruments qu'il aurait fallu reconstruire ou rénover d'une part, et les avis de spécialistes de la réplication d'autre part, justifiait ce "pressentiment".

de l'expérience dans son aspect "prise de mesure", malgré les appareils modernes que nous utilisions encore. Nous avons appris à manipuler le dispositif et compris encore mieux en quoi la maîtrise de la technique de l'émission cathodique est primordiale. De plus, la reconstruction de l'activité de mesure a rendu plus dynamique la description de Guye et Lavanchy, de saisir — ou du moins de faire des hypothèses sur — le rythme, la temporalité des manipulations.

Ainsi, si l'on peut juger ce travail comme un échec scientifique, nous le défendons d'un point de vue historique en relation avec la question soulevée à la fin de la première partie de la thèse.

> Pour quelles raisons un physicien des années 1920 peut-il considérer l'expérience de Guye et Lavanchy comme vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein ?

Les études menées dans les parties 2 et 3 nous ont conduit à renforcer l'hypothèse selon laquelle des raisons d'ordre expérimental sont à l'origine de la réception unanimement favorable des conclusions de Guye et Lavanchy : leur travail fait preuve d'une qualité expérimentale inégalée et que l'on ne pense pas pouvoir alors dépasser. L'étude historique de cette expérience par la démarche de réplication vient encore appuyer cette hypothèse.

Il n'est bien sûr pas question de prendre pour argument les difficultés que nous avons rencontrées pour juger la qualité du travail de Guye et Lavanchy. Cependant, ces difficultés nous ont orienté vers l'étude de la problématique expérimentale de l'émission cathodique, dont il faut tenir compte lors de la lecture des articles originaux. Les durées d'enregistrement photographique, le nombre de déterminations, la qualité des clichés présentés sont autant d'arguments qui montrent que Guye et Lavanchy possèdent une très grande maîtrise de l'émission cathodique, point alors reconnu comme très sensible.

Selon nous, un lecteur conscient de ces considérations ne peut que juger favorablement le travail de Guye et Lavanchy, quitte à passer outre une *précision numérique* exagérément mise en avant.

5

L'émission cathodique

Sommaire

Introduction 303

5.1 L'émission cathodique dans l'historiographie 304

5.2 Importance des mécanismes d'émission dans les classifications des rayonnements électriques 318

5.2.1 *Ions, Electrons, Corpuscules* en 1905 319

5.2.2 Townsend et les phénomènes électriques dans les gaz (1915) 320

5.2.3 Les mesures de la charge spécifique présentées par Gerlach (1926) 321

5.2.4 Une classification des décharges électriques dans les gaz . . 322

5.2.5 Les "Rayons Cathodiques" vus par Lenard et Becker 323

5.2.6 Retour à la présentation de Gerlach 325

5.3 Mécanismes d'émission et mesure des propriétés électrique et inertielle des rayons cathodiques 327

5.3.1 Choix et présentation du corpus étudié 327

5.3.2 Mesurer de la charge spécifique : étudier la composition des rayonnements électriques 327

5.3.3 Recherche de précision dans la mesure de la charge spécifique 331

5.3.4 Etude de la variation de l'inertie des électrons artificiellement accélérés : débat autour des techniques de production 337

Conclusion **341**

"Se pouvait-il que quelque chose semble à première vue plus difficile à appréhender qu'un objet si petit, que sa masse est une fraction insignifiante de la masse d'un atome d'hydrogène — lui-même si petit qu'un ensemble de ces atomes, en nombre égal à la population du monde entier, serait trop petit pour être détecté par aucun des moyens alors connus par la science ?" [1]

Introduction

Cette dernière partie de la thèse constitue une recherche complémentaire au travail réalisé sur les expériences de Guye, Ratnowsky et Lavanchy. Les problèmes liés à la réalisation puis à la maîtrise de l'émission cathodique avec le dispositif de Guye et Lavanchy nous ont en effet amené à chercher comment leurs contemporains traitaient cet aspect expérimental dont nous n'avions pas perçu toute l'importance à la lecture des articles. L'émission cathodique nous est alors apparue comme une problématique expérimentale d'une richesse que nous ne soupçonnions pas initialement, et qui n'était que partiellement documentée par les travaux des historiens des sciences. Cette recherche s'est avérée féconde du point de vue de la thèse d'une part, mais également de façon plus générale, en mettant en évidence l'existence de débats d'ordre technique et expérimental au sujet de la façon de produire les rayonnements électroniques.

Nous présentons pour commencer les conclusions lacunaires tirées de l'historiographie. Ensuite, par l'étude de quelques ouvrages sur les rayonnements électriques, nous montrons que la problématique expérimentale de l'émission cathodique revêt en fait une réelle importance dans les premières décennies du XX^{e} siècle. Enfin, nous étudions plus particulièrement les publications de 21 recherches menées entre 1901 et 1916 sur ce que l'on appelle aujourd'hui indifféremment "rayons cathodiques". Nous montrons alors comment l'étude des différents "modes de production" des rayonnements électriques conduit les physiciens des années 1900/1910 à mettre au point des "techniques d'émission" de ces rayonnements dont le choix est contraint par leurs objectifs expérimentaux.

1. "Could anything at first sight seem more impractical than a body which is so small that its mass is an insignificant fraction of the mass of an atom of hydrogen ? – which itself is so small that a crowd of these atoms equal in number to the population of the whole world would be too small to have been detected by any means then known to science." Enregistrement de J. J. Thomson réalisé en 1934 et tiré du film *Atomic Physics* (1947). Disponible sur http ://www.aip.org/history/electron/jjsound.htm, consulté le 01 mars 2011.

5.1 L'émission cathodique dans l'historiographie

Les phénomènes électriques dans les gaz sont connus depuis le début du XVIII^{e} siècle [2]. Pourtant, il faut attendre la fin des années 1850 et les années 1860 pour voir apparaître un peu d'ordre dans un domaine expérimental où règne une grande confusion [3].

Si Plücker est le premier à réaliser des observations qui s'avéreront par la suite capitales, c'est qu'il bénéficie dans son laboratoire de l'Université de Bonn d'un collaborateur précieux en la personne de Heinrich Geissler, souffleur de verre d'une qualité exceptionnelle et fabricant d'instruments scientifiques. En particulier, c'est grâce à la pompe à vide de Geissler, introduite au laboratoire en 1857, que tous les deux, aidés par l'assistant de Plücker, Theodor Meyer, parviennent à étudier la décharge dans les gaz à des pressions encore jamais atteintes [4]. Ils montrent que l'espace obscur découvert par Faraday entre la lumière positive, du côté de l'anode, et la lumière négative, du côté de la cathode, s'accroît lorsque la pression diminue, et que, en même temps, la lumière positive et les stries qui la composent reculent vers l'anode, alors que la lumière négative s'étend dans le tube.

Par la suite, Plücker montre l'effet du champ magnétique sur les phénomènes se produisant dans le tube. Il observe également que la lumière négative induit une fluorescence du verre. Une dizaine d'années plus tard, Hittorf procède à des recherches complémentaires sur cette lumière négative. Comme le souligne Müller [5], c'est Hittorf qui, le premier, travaille de façon organisée sur la décharge électrique. Et c'est en apprenant à contrôler les phénomènes dans le tube, grâce à une maîtrise toujours meilleure des techniques pour rendre le tube étanche et stabiliser la pression, qu'il parvient à mener ses recherches [6].

Il montre que, lorsque la pression est suffisamment faible, la lumière négative est

2. Anderson (1964, p. 21) et Smith (2001, p. 27).

3. Selon Darrigol, "les premiers physiciens qui ont mis un peu d'ordre dans le *bric-a-brac de la décharge dans les gaz* sont Julius Plücker et son disciple [Johann] Wilhelm Hittorf"; Darrigol (2000, p. 275).

4. Les travaux de Plücker et de ses collaborateurs, ainsi que l'importance capitale de la pompe à vide mise au point par Geissler, ont été étudiés en détails par Müller (2004, chap. 1).

5. Müller (2004, p. 79) : "Hittorf peut être considéré comme le premier chercheur à appliquer les moyens et les méthodes — principes, instruments, procédés de mesure — à l'étude des propriétés électriques associées aux phénomènes lumineux le long du passage de la décharge. Il peut ainsi mener un programme de mesures de précision des propriétés des phénomènes dans la recherche sur la décharge dans les gaz.".

6. Pour plus de détails sur les techniques utilisées par Hittorf, voir Müller (2004).

décomposée en trois couches. Contre la cathode se trouvent une couche lumineuse, puis un espace sombre, appelé plus tard espace de Crookes, qui s'étend avec la diminution de pression, et enfin un espace lumineux qui s'étend jusqu'à l'espace obscur de Faraday. Hittorf réalise ensuite une observation particulièrement surprenante. Dans un tube en L, la lumière négative ne suit pas les contours du tube, contrairement à la lumière positive, mais suit une ligne droite. Il fait alors l'hypothèse qu'elle est formée de rayons qu'il nomme "*Glimmstrahlen*". Il observe également que ces supposés rayons projettent une ombre bien définie sur les parois des tubes lorsqu'il place des objets entre la cathode et le verre.

Dans le cadre de son programme de recherche, Hittorf étudie l'influence de la forme et de la nature des électrodes sur la décharge, et plus particulièrement sur les deux types de lumières, négative et positive. Il montre que, du point de vue de la conduction électrique, les phénomènes à la cathode et à l'anode sont différents : la résistance au passage du courant dans la lumière négative est bien plus élevée que pour la lumière positive.

Ces trois propriétés (propagation sous la forme de rayons, fluorescence et résistance) font de la lumière négative un phénomène bien particulier. Hittorf interprète celle-ci comme un mode particulier de conduction électrique propre aux gaz, et c'est à ce titre qu'il porte son attention sur elle.

Les travaux de Hittorf sont tout d'abord largement ignorés. Ce n'est qu'à partir de 1872 qu'un étudiant de Helmholtz à Berlin, Eugen Goldstein, reprend ses travaux sur les rayons de la lumière négative. Par la suite, plus précisément en 1876, il les appellera "*Kathodenstrahlen*"[7]. En accord avec Hittorf, il conclut que ces rayons représentent un courant, mais il ne voit pas de différence fondamentale entre les rayons cathodiques et la lumière positive[8].

En 1878, c'est un Anglais, William Crookes, qui se lance dans l'étude de la décharge dans les gaz. Il bénéficie dans ces travaux des talents de son élève et ami Charles Henry Gimingham pour le soufflage du verre et les techniques du vide[9], ce qui lui permet de mener des recherches à des niveaux de vide bien plus faibles que ses prédécesseurs allemands. Il redécouvre les rayons cathodiques et leurs propriétés. L'interprétation qu'il en fait est cependant bien différente de celles proposées par Goldstein, Hittorf ou encore Eilhard Wiedemann, pour qui les phénomènes dans

7. Goldstein (1876, p. 286) ; Müller (2004, p. 80 ; note 128).
8. Goldstein (1879). Pour une étude plus détaillée des travaux de Goldstein, voir Buchwald (1994, p. 135-138).
9. Voir Darrigol (2000, p. 281).

les gaz sont essentiellement des ondes dans l'éther. Pour Crookes, les rayons cathodiques sont un torrent de molécules chargées projetées par la cathode. Il explique ainsi de nombreux phénomènes observés dans les tubes. La luminosité vient des chocs entre les molécules chargées composant les rayons cathodiques et les molécules encore présentes dans le tube ou celles des parois du verre. Le premier espace obscur correspond à la distance parcourue par ces molécules avant de subir des chocs, en d'autres termes leur libre parcours moyen.

L'interprétation de Crookes est critiquée sur deux points en particulier. D'une part, le libre parcours moyen de molécules chargées serait beaucoup plus faible que celui effectivement observé dans un tube à décharge. D'autre part, l'absence d'effet Doppler dans l'observation au spectroscope des effets lumineux de la décharge implique une vitesse des molécules lumineuses de l'ordre de 1 $km.s^{-1}$, alors que les effets thermiques observés lors de l'impact des rayons sur les parois du tube exigent une vitesse cent fois plus élevée [10].

En réponse aux affirmations de Crookes, les physiciens allemands développent des modèles différents dont la caractéristique est de mettre en avant le rôle joué par l'éther.

Ces débats sur la nature de la décharge électrique dans les gaz et les questions ainsi soulevées sur la nature des phénomènes électriques contribuent à faire de ce domaine de recherche un sujet de première importance. À Berlin, le jeune Heinrich Hertz y voit l'occasion de travailler dans un champ expérimental prometteur. En 1882, il commence ce travail en apprenant tout d'abord à utiliser les "tubes de Geissler", en se familiarisant avec les phénomènes connus, en reproduisant les expériences et en en imaginant de nouvelles [11].

Après cette phase d'apprentissage, au cours de laquelle il bénéficie de l'expertise de Goldstein, Hertz cherche à montrer que les rayons cathodiques sont distincts des courants électriques dans le tube, ce qui leur donnerait une signification particulière, une certaine indépendance du phénomène de décharge électrique. Il réalise dans ce but plusieurs expériences. Dans une première, il s'attaque à l'idée généralement admise selon laquelle le mécanisme de la décharge est intermittent. Ensuite, il réalise

10. Ces arguments sont développés par E. Wiedemann en 1880 (voir Darrigol (2000, p. 284 et p. 284, note 37)) et Goldstein en 1881 (voir Goldstein (1881), Anderson (1964, p. 29) et Darrigol (2000, p. 284 ; note 36)).

11. Hertz cité par Buchwald (1994, p. 131) : "I [...] keep rushing about without any fixed plan, familiarizing myself with what is already known, repeating the experiments, and setting up other experiments as they occur to me ; this is great fun, for the phenomena are mostly very beautiful and infinitely varied.".

le "divorce"[12] entre rayons cathodiques et courant électrique en montrant que les lignes de courant dans le tube ne suivent pas les rayons cathodiques. Il peut ainsi affirmer que les rayons cathodiques constituent un phénomène bien distinct des processus à l'œuvre dans la décharge. Enfin, il étudie les effets électromagnétiques et électrostatiques des rayons cathodiques. Après des expériences aujourd'hui connues comme l'"échec"[13] de Hertz à réaliser la déviation électrique des rayons cathodiques, il affirme que les "propriétés magnétiques ou électrostatiques des rayons cathodiques sont soit nulles soit très faibles"[14]. Ces derniers résultats n'ont que peu d'impact immédiat. En revanche, la cartographie du courant de décharge est immédiatement reprise par E. Wiedemann qui avance alors l'idée que les rayons cathodiques sont en fait des rayons lumineux de grande fréquence[15], et qu'ils ne "jouent aucun rôle dans la formation du courant ou le transfert d'électricité"[16].

Il peut sembler étrange à première vue que les résultats de Hertz sur la nature non électrique des rayons cathodiques n'aient pas attiré l'attention des physiciens avant la fin des années 1890. Le lecteur moderne sait en effet que la question de la nature des rayons cathodiques a joué un rôle important dans la découverte de l'électron. Il sait également le rôle que jouent les électrons dans la conduction électrique. En fait,

> "On tend à oublier combien l'importance fondamentale des rayons cathodiques est plus claire rétrospectivement qu'elle ne l'était durant les six décennies de recherches sur les décharges électriques à des pressions réduites avant les dernières années du XIX^{e} siècle. [...] Aucune des découvertes [de Hittorf, Goldstein ou Crookes] ne liait cependant les rayons cathodiques à la décharge visible, qui tend à disparaître à des degrés de raréfaction convenables pour étudier les rayons."[17]

Ainsi, Hertz est le seul à étudier les rayons cathodiques en tant que tels[18]. L'intérêt de ses contemporains ne se porte pas sur eux mais sur la décharge électrique. La question de la nature des rayons cathodiques ne se pose pas encore.

12. Selon les expression de Buchwald (1994, p. 150) et Darrigol (2000, p. 285).
13. Hon (1987) et Buchwald (1995).
14. Hon (1987).
15. Darrigol (2000, p. 286).
16. Cité par Darrigol (2000, p. 286).
17. Smith (2001, p. 27) : "One tends to forget how much clearer the fundamental importance of cathode rays is in retrospect than it was during the six decades of research on electrical discharges at reduced pressures prior to the last years of the nineteenth century. [...] None of [Hittorf, Goldstein or Crookes'] findings, however, linked the cathode rays with the visible discharge, which tends to disappear at rarefactions suitable for investigating the rays.".
18. Darrigol (2000, p. 313) : "Personne n'étudie les rayons cathodiques pour eux-même, à part Hertz".

Au début des années 1880, les hypothèses sur la nature du ou des processus à l'œuvre au cours de la décharge électrique dans des gaz raréfiés sont donc de deux types. D'une part, les physiciens allemands, au premier rang desquels Goldstein et E. Wiedemann, soutiennent des hypothèses fondées sur des processus dans l'éther. D'autre part, les physiciens anglais travaillent sur la base de l'hypothèse moléculaire de Crookes.

En 1882, Arthur Schuster, Anglais d'origine allemande, se lance dans l'étude de la décharge électrique [19]. En 1884, il propose une théorie de la décharge dans laquelle les molécules du gaz sont dissociées en ions sous l'effet du fort champ électrique au niveau de la cathode, ceux-ci étant alors attirés par les électrodes selon leur signe. Il propose donc une conception d'origine électrolytique, dont il explique les différences avec la conduction électrolytique à proprement parler par la difficulté plus grande à ioniser un gaz [20].

Dans sa *Lecture* de 1884, Schuster propose une façon de mesurer la charge spécifique des particules issues de la décomposition des molécules [21], à partir de la déviation magnétique des rayons formant la lumière négative et de leur vitesse. Mais il ne peut alors pas proposer une telle mesure. En 1890, au cours de sa seconde *Lecture* [22], il ne donne qu'un encadrement large de la charge spécifique. La déviation magnétique et plus précisément la mesure du rayon de courbure de la trajectoire lui donne l'équation suivante : $\frac{e}{m} = \frac{v}{Mr}$. Le problème qui se pose à lui est en effet celui de la vitesse. Il affirme que si les particules ne perdent pas d'énergie au cours de leur transport entre les électrodes, leur vitesse est donnée par l'énergie potentielle du champ électrique entre les électrodes, soit $2Ve = mv^2$ [23]. D'un autre côté, il propose comme limite inférieure le cas où la vitesse des particules est de l'ordre des vitesses thermiques moléculaires. Il conclut en rappelant que la charge spécifique de l'hydrogène est connue et se situe entre ces limites, ce qui lui permet d'affirmer que sa théorie est confirmée.

Un autre élément important de la vision développée par Schuster est l'importance qu'il attribue à la lumière négative et aux rayons cathodiques. Pour lui, la

19. Mulligan (1997).
20. Cette théorie diffère de celle de Crookes sur le mode de formation des ions. Pour Crookes, les molécules neutres se chargent négativement lors des collisions avec la cathode. Pour Schuster, cela est impossible. Voir Anderson (1964, p.31) et Darrigol (2000, p.288-289).
21. Schuster (1884, p. 331-332).
22. Schuster (1890, p. 545-547).
23. e est la charge transportée par les particules, m leur masse, v leur vitesse, V la différence de potentiel entre les électrodes, M le champ magnétique, et r le rayon de courbure de la trajectoire.

dissociation des molécules a lieu près de la cathode où la chute de potentiel est la plus importante. De plus, le courant de décharge est pour lui lié à la propagation des ions négatifs repoussés par la cathode.

À l'inverse, J. J. Thomson, qui accepte l'hypothèse proposée par Schuster sur la nature des rayons cathodiques, envisage le courant de décharge comme reposant essentiellement sur des processus de décomposition-recomposition dans la colonne positive. Pour Thomson, les "phénomènes en lien avec les rayons négatifs ne jouent qu'un rôle mineur dans le transport du courant à travers le gaz" [24].

Au début des années 1890, pour la majorité des chercheurs, les rayons cathodiques ne constituent toujours pas un sujet d'étude d'une importance primordiale, même pour Thomson qui sera par la suite crédité de la découverte de l'électron. Mais plusieurs faits nouveaux vont amener les scientifiques à travers l'Europe à s'y intéresser de plus près.

En 1892, Hertz travaille à nouveau sur les rayons cathodiques, mais cette fois, suite à sa mise en évidence de la propagation d'ondes électromagnétiques quelques années plus tôt, sa réputation d'expérimentateur est bel et bien établie. Il découvre alors que les rayons cathodiques ont la propriété de traverser de fines couches de métal. Il invite son assistant Philipp Lenard à utiliser cette propriété nouvelle pour faire passer les rayons cathodiques hors du tube à décharge dans lequel ils sont produits. L'idée de Hertz est qu'ainsi, il devient possible d'observer les rayons de façon "plus pure que ce qui a été réalisé jusque là" [25].

Pour ce faire, Lenard met au point un dispositif qui sera plus tard appelé "fenêtre de Lenard" [26]. Le tube est divisé en deux chambres par une feuille d'aluminium. Dans la première se trouvent les électrodes permettant la décharge et donc la production des rayons cathodiques. La pression y constitue un paramètre contraignant. Dans la seconde, il est possible de travailler à la pression que l'on souhaite. Lenard montre tout d'abord que les rayons qui passent à travers la fenêtre d'aluminium ont les même propriétés que les rayons cathodiques. Il étudie ensuite leur comportement dans différents gaz à différentes pressions. Il montre en particulier que les rayons cathodiques se propagent à des pressions très faibles, c'est-à-dire dans un vide très poussé, mais aussi que leur déviation magnétique est indépendante de la nature du gaz, et enfin qu'ils se propagent sur de plus grandes distances dans l'air à pression

24. Darrigol (2000, p. 301).
25. Selon les souvenirs de Lenard, exprimés au cours de son intervention pour la remise de son Prix Nobel en 1905. Cité par Mulligan (1999, p. 355).
26. Darrigol (2000, p. 301-303).

atmosphérique que ce qui était attendu par les modèles ioniques proposés par les Anglais.

La propriété de traverser des métaux et la dispersion des rayons selon la densité du gaz traversé tendent à confirmer la nature ondulatoire des rayons cathodiques. Lenard précise également que selon ses recherches sur la propagation des rayons dans des milieux de densités variables, leur longueur d'onde doit être très faible. Thomson réagit à ces résultats en affirmant que la fenêtre de métal devient à son tour une cathode suite à l'impact des rayons cathodiques primaires. De plus, il mesure la vitesse des rayons et trouve une valeur près de 1000 fois plus faible que celle de la lumière. Cette réfutation n'a que peu d'impact sur les tenants de la théorie ondulatoire.

La découverte d'un nouveau phénomène à la fin de l'années 1895 va relancer le débat sur les rayons cathodiques et lui faire prendre une place centrale dans les débats autour de la nature de l'électricité. Dans son laboratoire de Würzburg, Wilhelm Konrad Röntgen travaille sur un tube dans lequel sont produits des rayons cathodiques qu'il étudie très probablement dans la lignée des travaux de Lenard. Pour détecter les rayons cathodiques en dehors du tube, il utilise du papier fluorescent. Mais Röntgen s'aperçoit un jour qu'une feuille de ce papier s'illumine alors que les rayons cathodiques ne peuvent pas s'être propagés jusqu'à elle. Il se lance alors dans une série d'expérimentations afin de déterminer la cause de ce phénomène. Il soupçonne en fait un nouveau type de rayonnement, et il cherche alors à en établir les propriétés. Il montre que ces nouveaux rayons sont produits au cours de l'impact des rayons cathodiques sur les parois du tube, qu'ils ne sont pas déviés par un champ magnétique, qu'ils se propagent en ligne droite et qu'ils peuvent traverser la matière selon sa densité.

Ces nouveaux rayons sont appelés X en référence à leur nature inconnue. Très vite, dans les laboratoires européens, les expérimentateurs les soumettent à l'étude. L'hypothèse généralement admise quant à leur formation est que ce sont les collisions des rayons cathodiques avec les parois des tube et les pièces métalliques à l'intérieur qui émettent de la lumière à des fréquences très élevées. Dans ce cadre, les rayons cathodiques sont les "parents des rayons de Röntgen"[27] et à ce titre, ils méritent d'être étudiés plus attentivement.

Thomson va s'intéresser de près à cette question à partir de la fin 1896[28]. La

27. Selon l'expression de Thomson, cité par Darrigol (2000, p. 305).
28. Darrigol (2000, p. 305).

question est en premier lieu de déterminer leur nature. S'agit-il d'ondes dans l'éther électromagnétique ou alors de particules matérielles ? Depuis les débats du début des années 1880 entre Crookes et Goldstein ou E. Wiedemann, de nouveaux faits expérimentaux sont disponibles. Les travaux de Hertz en 1883 et 1892, et ceux de Lenard en 1894 fournissent des arguments en faveur de l'hypothèse ondulatoire. Mais, en 1895, Jean Perrin montre que les rayons cathodiques sont électrisés négativement. En 1897, Thomson modifie l'expérience de Perrin de sorte que la preuve soit irréfutable[29]. Pourtant, il reste une question à résoudre pour les tenants de l'hypothèse matérielle. En effet, la déviation magnétique des rayons cathodiques ne dépend pas de la nature du gaz résiduel dans le tube. Autrement dit, si les rayons cathodiques sont bien des particules matérielles, leur nature est indépendante de celle du gaz contenu dans le tube.

Au printemps 1897, Thomson réalise des mesures de la charge spécifique associée aux rayons cathodiques. Pour ce faire, il mesure leur déviation dans un champ magnétique. Il lui faut toutefois une seconde mesure pour déterminer complètement ce rapport $\frac{e}{m}$. Il y parvient de deux façons différentes, en mesurant d'une part la charge accumulée lors de l'impact des rayons et d'autre part la chaleur dégagée lors de cet impact. Il mesure alors une charge spécifique 1600 fois plus élevée que celle de l'ion hydrogène. Cette mesure, associée aux expériences de Lenard, permet à Thomson de proposer, le 30 avril 1897, l'hypothèse du "corpuscule", une particule beaucoup plus petite que les atomes et dont ceux-ci seraient formés. Six mois plus tard, il propose une nouvelle détermination de la charge spécifique en combinant déviations magnétique et électrique, ce qu'il n'avait pas réussi à faire avant, du fait du vide insuffisant dans son tube[30].

Des mesures de la charge spécifique des rayons cathodiques sont également proposées en Allemagne, et ce dès la fin 1896 par Emil Wiechert. Comme Lorentz et Larmor, Wiechert envisage l'électrodynamique comme pouvant se réduire au mouvement de particules chargées dans un éther stationnaire. L'originalité de son apport réside dans l'attention qu'il porte aux bases expérimentales de ses hypothèses, et en particulier aux travaux qu'il réalise sur les rayons cathodiques. Il partage avec Thomson et Schuster l'idée que les rayons X sont de la lumière à très haute fré-

29. Voir Buchwald (1995, p. 160) pour plus de détails.

30. Thomson justifie son échec par le fait que les rayons cathodiques ionisent le gaz résiduel qui fait alors écran au champ électrique extérieur. Il avance alors cette explication pour expliquer l'"échec" de Hertz en 1883. Pour plus de détails sur les expériences de Thomson, voir par exemple Anderson (1964), Falconer (1987), Arabatzis (1996) et Smith (2001).

quence émis lors de l'impact des rayons cathodiques sur une cible. Dans ce cadre, il suppose que les rayons cathodiques sont des particules chargées. En 1896, il réalise des mesures de la charge spécifique des rayons cathodiques en combinant la déviation magnétique des rayons et la mesure de la chute de potentiel à la cathode. Le résultat le surprend car il obtient une valeur beaucoup plus élevée que celle connue pour l'ion hydrogène. Il est alors conduit à remettre en doute la vitesse des rayons cathodiques mesurée par Thomson deux années plus tôt. Il réalise lui-même une telle mesure et montre que la vitesse des rayons cathodiques est supérieure à $3.10^7\ m.s^{-1}$. Il peut alors en déduire une valeur de la charge spécifique des rayons cathodiques 2000 fois plus élevée que celle de l'ion hydrogène. Il annonce ses résultats le 7 janvier 1897 et peut conclure que les particules composant les rayons cathodiques sont les "atomes électriques", constituants uniques de la matière, centres d'excitation dans l'éther stationnaire [31].

À Berlin, Kaufmann travaille également sur les rayons cathodiques dont il cherche à déterminer précisément la nature. Il fournit en fait la mesure la plus précise de la charge spécifique des rayons cathodiques au cours de travaux réalisés en collaboration avec Aschkinass et S. Simon entre 1897 et 1899 [32].

Thomson n'est donc pas le seul à proposer une mesure de la charge spécifique pour les rayons cathodiques, ce qui a contribué à alimenter le débat sur l'attribution de la "découverte de l'électron" [33]. En fait, les toutes dernières années du XIX^e siècle voient d'autres expérimentateurs proposer de telles mesures, pour les rayons cathodiques, mais également pour les rayons de Lenard, les particules émises par effet photoélectrique et celles émises par des cathodes incandescentes [34]. Toutes ces mesures donnent des résultats très similaires, appuyant l'hypothèse d'un constituant

31. Sur les théories de Wiechert, voir Darrigol (2000, p. 343-347).

32. Les travaux de Kaufmann sur les rayons cathodiques sont bien moins documentés que ses travaux postérieurs sur la variation de l'inertie des rayons β. On pourra trouver quelques renseignements dans Miller (1981, p. 107-108), en particulier sur la nécessité pour Kaufmann et Simon de réaliser une cartographie du champ magnétique afin de mesurer la charge spécifique de façon précise. Kaufmann sera d'ailleurs proposé pour le Prix Nobel 1905 pour ces mesures ; voir Falconer (2001, p. 98).

33. Pendant longtemps, la "découverte de l'électron" a été attribuée à Thomson uniquement. Depuis quelques années, cette attribution a été remise en cause, d'une part suite à la mise en évidence de l'importance des travaux de Wiechert et Kaufmann sur les rayons cathodiques, d'autre part sur le terme même de "découverte". Voir Falconer (1987), Robotti (1995), Arabatzis (1996), Buchwald et Warwick (2001) et Arabatzis (2006).

34. L'effet de la température de la cathode — appelé aujourd'hui effet thermionique — sur la décharge électrique est alors connu depuis longtemps. Dans les années 1880, les physiciens allemands Hans Elster et Julius Geitel ont étudié l'effet du chauffage des électrodes sur le passage de la décharge. L'effet photoélectrique a été mis en évidence par Hertz en 1887.

fondamental de toute la matière, l'électron ou le corpuscule [35].

Les expériences sur les différents rayonnements électriques dans les années 1897-1900 servent à étudier leur composition. Le consensus sur leur nature unique se fait progressivement. Chaque expérience requiert toutefois des techniques différentes. L'émission cathodique via un régime de décharge électrique permet de mesurer la charge spécifique en combinant la déviation magnétique et une mesure de l'énergie cinétique des particules. Avec les rayons de Lenard, il est possible de réaliser les déviations des faisceaux, c'est-à-dire de manipuler les électrons, dans des conditions plus "pures" puisque le tube de déviation et d'observation peut être isolé du tube de décharge où se produit l'émission primaire.

Pour les particules émises par effet photoélectrique, la situation est quelque peu différente. Thomson montre en 1899 que ce mode de production de particules électriques permet de déterminer leur charge *et* leur charge spécifique [36]. Mais il ne les émet pas sous forme de faisceau, contrairement à Lenard qui parvient quant à lui la même année à utiliser l'effet photoélectrique dans un tube à très faible pression. La même observation avait été réalisée dès 1890 par Augusto Righi, mais son résultat est demeuré peu connu jusqu'au travail de Lenard [37]. En fait, Lenard remarque que tout se passe comme lors de l'émission de rayons cathodiques, bien que le vide poussé ne permette pas de réaliser l'émission cathodique à proprement parler, et cela lui permet de mesurer la charge spécifique des particules photoélectriques et des rayons cathodiques. Thomson et Lenard concluent à l'identité des particules émises dans les deux cas.

L'effet thermionique est quant à lui utilisé par Thomson comme dans le cas de l'effet photoélectrique pour mesurer la charge spécifique. Ce phénomène d'émission

35. Pour quelques détails sur ces mesures, voir Smith (2001, p.45 et p. 50-55). Nous ne parlons pas ici de l'effet découvert par Zeeman de dédoublement des raies du sodium qui permet également une mesure de la charge spécifique de l'électron, ni du rayonnement β qui est une émission naturelle d'électrons ; voir par exemple Arabatzis (1992).

36. Smith (2001, p. 53).

37. En fait, bien que cela ne soit, à notre connaissance, explicité clairement nulle part,il semblerait que Thomson ne travaille pas à pression suffisamment faible contrairement à Lenard qui utilise cet effet. Lelong (1995, p. 220) : "Les méthodes de mesure de e/m déjà existantes ne pouvaient pas être appliquées aux effets photoélectrique et thermionique : il fallut en imaginer et en mettre au point de nouvelles spécifiquement pour ces deux effets." ; Smith (2001, p. 52-53 ; nous traduisons) : "Comme la collimation des décharges photoélectriques et par filament incandescent [*incandescent-filaments discharge*] en un faisceau visible sur l'écran ne pouvait pas être réalisée aisément, aucune des méthodes utilisées par Thomson pour déterminer m/e pour les rayons cathodiques n'était applicable." ; Wheaton (1978, p. 311) : "La décharge photoélectrique n'est portée par des rayons cathodiques purs que pour des vides élevés.".

électronique sera étudié expérimentalement et théoriquement par Owen Willans Richardson au début des années 1900 [38]. Il semble toutefois qu'il ne sera réellement mis à profit, dans un contexte bien différent de celui de la fin des années 1890, que dans les années 1910 avec la mise au point d'un tube à rayons X basé sur ce principe. Il s'agit du tube construit par William David Coolidge en 1913 [39].

A partir de 1900, un consensus semble établi sur l'identité des rayonnements électriques que sont les rayons cathodiques, de Lenard, photoélectriques, thermoélectriques et β. Dans tous ces cas, c'est la même particule qui est émise. Les questions qui demeurent sont celles de la nature de cette particule, de sa description théorique et de ses caractéristiques. Dès lors, les expérimentateurs qui participent à ces recherches peuvent choisir d'utiliser l'un ou l'autre de ces rayonnements. Mais quels peuvent-être les critères de leurs choix ?

Très certainement, la possibilité de maîtriser les techniques adéquates à la réalisation des expériences joue un rôle, de même que celle d'avoir les appareils nécessaires [40]. Un autre élément apparemment déterminant concerne les possibilités expérimentales offertes par tel ou tel type de rayonnement. Les électrons émis par radioactivité β le sont dans un large intervalle de vitesse dont la limite supérieure atteint presque celle de la lumière. Les électrons émis artificiellement doivent quant à eux être accélérés. Or les performances des générateurs disponibles alors ne permettent que d'atteindre des vitesses de l'ordre de la moitié de celle de la lumière [41].

Une question demeure cependant. Comment les expérimentateurs qui travaillent sur des électrons émis artificiellement choisissent-ils entre les différentes techniques à leur disposition ?

L'exemple de Lenard nous donne accès à une première réponse possible. Au cours des années 1890, il travaille sur deux sujets : les rayons cathodiques et leur transmission à travers des feuilles métalliques — les rayons de Lenard — et l'effet photoélectrique. Il souligne la possibilité qu'offre le dispositif de fenêtre portant son nom de travailler sur des rayons cathodiques "purs" [42]. De même, ses travaux sur

38. Les travaux de Richardson sur l'émission thermionique sont décrits par Knudsen (2001).
39. Rousseau (2003).
40. Ainsi, du radium utilisé comme source *efficace* d'émission β n'était pas aisément disponible. Selon Miller (1981, p. 58), Kaufmann doit par exemple s'en procurer auprès des Curie.
41. Miller (1981, p. 46) remarque que Kaufmann envisage les rayons β comme les "candidats idéaux pour enquêter sur la 'vraie nature' de l'électron".
42. Wheaton (1978, p. 305) et Lenard (1967, p. 107), cité par Mulligan (1999, p. 355) : "Il devrait [...] être possible d'observer les rayons [cathodiques] dans l'autre compartiment de façon plus pure que ce qu'il était possible de faire jusqu'à présent [...]". L'expression "rayons purs" signifie

les rayons émis pas effet photoélectrique permettent de travailler sur des rayons cathodiques dans des vides très poussés.

Ces remarques sur les travaux de Lenard soulignent l'un des problèmes posés par l'emploi d'électrons émis dans un tube à décharge : l'air résiduel, nécessaire à l'émission, empêche de travailler avec des rayons "purs", et empêche également de travailler avec des rayons très lents. Dans ce dernier cas en effet, il faut une très basse tension entre les électrodes. Mais cela n'est pas possible dans un tube à décharge classique, car la pression requise pour l'émission à basse tension est trop élevée pour que les rayons se propagent dans le tube ; le nombre important de molécules encore présentes dans le tube empêche la propagation [43].

Les difficultés soulevées par la présence d'air résiduel dans les tubes à décharge ne tiennent pas uniquement à l'aspect souligné par Lenard. En fait la pression dans le tube ne demeure pas constante pendant l'émission. Les parois peuvent absorber une partie des ions, ce qui entraîne une diminution de pression. L'émission ne peut alors plus avoir lieu — pour un potentiel fixé. Le tube est devenu "dur". Pour remédier à la disparition de l'émission, il faut chauffer le tube. Les parois relâchent une partie des gaz absorbés, la pression augmente, l'émission revient. D'autres techniques de régulation sont imaginées. C'est en grande partie pour résoudre les difficultés liées à la stabilité de l'émission que Coolidge met au point le tube qui porte son nom en 1913 [44].

La synthèse qui précède a été effectuée sur la base des travaux d'historiens traitant de près ou de loin de l'objet "rayons cathodiques", de son apparition à son utilisation au cours des deux premières décennies du XX^{e} siècle. L'idée à l'origine de ce travail était de trouver dans les recherches historiques existantes des réponses aux questions soulevées au cours de la phase d'expérimentation avec le tube cathodique copie du tube de Guye et Lavanchy. Ces questions concernaient l'émission cathodique en tant que problématique expérimentale et les différentes techniques à disposition des chercheurs contemporains de Guye. Elles avaient été soulevées par les remarques

en fait "rayons observés dans des conditions pures", c'est-à-dire sans que les molécules résiduelles perturbent leur propagation.

43. Wheaton (1978, p. 312) : "[Lenard] a réalisé de plus que ces rayons cathodiques [émis par effet photoélectrique] avaient une vitesse beaucoup plus faible que les autres, ce qui donnait l'opportunité de mettre en œuvre de nouvelles études d'importance fondamentale sur les rayons cathodiques".

44. Rousseau (2003). L'article original de Coolidge date de décembre 1913. Le titre est révélateur : "A powerfull Röntgen ray tube with a pure electron discharge". Coolidge commence par rappeler les difficultés connues associées aux tubes à rayons X, au premier rang desquelles il place les problèmes de stabilité de la pression et leur impact sur l'émission électronique ; Coolidge (1913).

de Guye et Lavanchy relatives aux difficultés reconnues de réaliser l'émission cathodique "dès qu'il s'agit de produire des rayons de grande vitesse", ainsi qu'à la mise en opposition de leur travail avec celui de Hupka au sujet de l'émission.

Plusieurs points ressortent particulièrement de cette recherche historiographique.

Jusque dans les années 1890, le rayonnement cathodique n'apparaît pas comme un phénomène revêtant une importance particulière aux yeux de la très grande majorité des physiciens, dont l'intérêt se porte davantage sur la conduction de l'électricité dans les gaz jugée indépendante des rayons cathodiques. Ces recherches sont néanmoins l'occasion pour les expérimentateurs de développer et de généraliser l'utilisation des techniques qui s'avéreront plus tard de première importance. Des nouveaux types de pompe à vide sont mis au point, les techniques de soufflage de verre et de soudure verre/métal sont améliorées, de même que les techniques de production et d'utilisation de tensions très élevées. De plus, toutes ces recherches sont de toute évidence l'occasion de mettre au point des savoir-faire associés à l'étude des phénomènes électriques dans les gaz.

Les historiens accordent la primauté aux techniques du vide. Plücker a pu étudier des phénomènes encore jamais observés grâce à la pompe de Geissler. Hittorf est parvenu à étudier de façon systématique des phénomènes qu'il a su stabiliser grâce à sa maîtrise des techniques associées au maintien du vide dans le tube à décharge ; Crookes a su tirer le plus grand profit des talents de son souffleur de verre pour étudier la décharge dans des vides toujours plus poussés ; Hertz n'a pu observer la déviation électrostatique des rayons cathodiques du fait d'un vide insuffisant [45] ; Thomson y est parvenu en faisant attention à ce point précis.

A la fin des années 1890, plusieurs expérimentateurs réalisent des mesures de la charge spécifique associée à divers types de rayonnement. Peu à peu, un consensus se crée autour de l'hypothèse selon laquelle tous ces rayonnements sont constitués d'un seul et même composant, beaucoup plus petit que les atomes et chargé négativement. Apparemment, seul Lenard se préoccupe des conditions de l'émission cathodique.

Ainsi, dans l'historiographie, la question de l'émission cathodique au cours du XIX^{e} siècle est largement occultée par celle plus théorique de la nature de l'électricité, même si certaines spécificités techniques ressortent.

La situation au début du XX^{e} siècle est plus confuse. Il semble que, de la même manière qu'un consensus théorique a été (quasiment) réalisé autour du concept

45. Mattingly (2001a), Mattingly (2001b), Buchwald (2001).

d'électron, les expérimentateurs se contentent de manipuler ces électrons. Les seules questions techniques relevées par les historiens sur les expériences du début des années 1900 concernent essentiellement les problèmes associés à des questions de pression dans les tubes [46].

Nous ne souscrivons pas à une telle interprétation des travaux expérimentaux réalisés entre 1900 et 1920. Les remarques de Guye et Lavanchy tendent à nous faire penser qu'au contraire, la question de l'émission d'électrons et des choix techniques auxquels procèdent les expérimentateurs revêt une certaine importance [47].

46. Miller (1981, p. 335-341).

47. De même, les "ingénieurs-scientifiques" qui développent des appareils basés sur cette émission, par exemple l'oscilloscope cathodique, fondent leurs inventions sur des savoir-faire techniques davantage que théoriques ; Gooday (2001, p. 118-120). L'expression "ingénieurs-scientifiques" est reprise par Gooday chez Hong (1995).

5.2 Importance des mécanismes d'émission dans les classifications des rayonnements électriques

La physique des rayonnements électriques semble prendre un tournant dans les toutes dernières années du XIX^{e} siècle. L'hypothèse selon laquelle ils sont identiques du point de vue de leur constitution s'impose, et les expérimentateurs sont désormais en mesure de les manipuler avec toujours plus de maîtrise.

Devons-nous pour autant en conclure que le réductionnisme théorique autour du concept d'électron est assimilé par les expérimentateurs dont les travaux peuvent, rétrospectivement, être interprétés comme les premières mesures des caractéristiques de l'objet théorique "électron" ? Autrement dit, et de façon plus générale, comment les développements théoriques sont-ils assimilés et utilisés dans les laboratoires ? Comment se traduit un concept théorique dans un laboratoire expérimental ?

Des éléments de réponse sont donnés par les études sur les "ingénieurs-scientifiques". Gooday affirme par exemple que "les techniciens et les physiciens ont développé les premières technologies associées aux rayons cathodiques sans utiliser particulièrement les théories de l'électron ou du corpuscule", mais concède que cela ne signifie pas qu'ils ne "s'intéressaient pas à ces théories" [48]. Mais il s'appuie essentiellement sur les exemple de techniciens ou d'ingénieurs.

Qu'en est-il chez les physiciens situés à la frontière entre théorie et technique expérimentale, comme ceux qui réalisent les mesures de la charge spécifique associée aux rayonnements électriques ou de la variation de l'inertie avec la vitesse ?

En 1915, John S. Townsend publie un ouvrage intitulé *Electricity in gases* [49]. Dans la préface, il écrit :

> "Ces domaines de la science électrique [*electrical science*] ont connu une telle croissance ces dernières années qu'il est devenu impossible de donner une description complète des recherches principales en un ou deux volumes ordinaires." [50]

Les "domaines" dont il parle concernent l'étude des propriétés électriques des gaz et les radiations associées. Cette affirmation de l'un des spécialistes anglais des

48. Gooday (2001, p. 120).

49. Il s'agit d'une reprise du volume *Die Ionisation der Gase* qu'il a en partie rédigé quelques années plus tôt pour la série dirigée par Erich Marx et publiée entre 1916 et 1920, *Handbuch der Radiologie.* ; Townsend (1915).

50. "These branches of electrical science have increased so much in recent years that it has become impossible to give a complete description of the principal researches in one or two ordinary volumes".

phénomènes électriques dans les gaz souligne donc la très grande richesse de ce domaine expérimental, toujours fertile au milieu des années 1910.

5.2.1 *Ions, Electrons, Corpuscules* en 1905

Dix ans plus tôt, en France cette fois, paraît un ouvrage qui se veut un ouvrage de référence sur la physique des particules électriques, *Ions, Electrons, Corpuscules* [51]. Dans la préface, les directeurs de publication, Henri Abraham et Paul Langevin expriment l'objectif de cette publication :

> "La structure discontinue des charges électriques domine et pénètre la plupart des découvertes récentes en Physique ; cette forme nouvelle des conceptions atomistiques sert maintenant de guide à un grand nombre d'expérimentateurs. C'est pour faciliter les recherches, autant que pour préciser les caractères essentiels des idées actuelles, que la Société Française de Physique a jugé utile de réunir un ensemble de travaux concernant les circonstances d'observation et les propriétés des centres électrisés, ions, électrons ou corpuscules. Cette collection de Mémoires doit être surtout un Livre de références qui mette sous la main de physiciens de langue française un certain nombre de travaux utiles à consulter." [52]

Les développements théoriques sur la structure de l'électricité ont, pour Abraham et Langevin, un impact sur les expérimentateurs. Les nouvelles "conceptions atomistiques" leur servent de "guide". Comment cela se décline-t-il dans le corps de l'ouvrage ?

Les travaux réunis et traduits en français sont organisés par thèmes.

> "Le TABLEAU SYNOPTIQUE [...] donne une classification méthodique des Mémoires. L'ordre que nous y avons adopté est celui qui nous a paru devoir être le plus aisé à suivre pour les personnes qui n'auraient encore qu'une connaissance sommaire de toutes ces questions." [53]

La classification consiste en deux parties principales qui sont d'une part LES IONS, d'autre part LES ÉLECTRONS. La première est organisée selon deux sous-parties : les "*caractères et circonstances de production*" et les "*propriétés des ions*". La seconde est organisée selon trois sous-parties : les "*circonstances de production*", les "*propriétés des électrons*" et la "*mécanique électromagnétique*". Les "*circonstances de production*" des électrons sont divisées en cinq thèmes : "*rayons cathodiques*", "*rayons de*

51. ABRAHAM et LANGEVIN (1905).
52. ABRAHAM et LANGEVIN (1905, p. vii).
53. ABRAHAM et LANGEVIN (1905, p. vii).

Goldstein (Kanalstrahlen)"[54], "*action des radiations (rayons ultra-violets et rayons de Röntgen)*", "*corps radioactifs*" et "*corps incandescents*".

Dans cet ouvrage destiné à diffuser la vision discontinue de l'électricité, et en particulier le concept d'électron, les auteurs accordent une importance explicite aux *circonstances de production* qui définissent des dénominations spécifiques. Les "rayons cathodiques" correspondent aux électrons produits dans un tube à décharge. Cette expression n'est pas utilisée quand les électrons sont produits par utilisation de radiations ou par chauffage des électrodes.

Ainsi, bien que la conception d'une structure discontinue de l'électricité soit acceptée et mise en avant, Abraham et Langevin n'en demeurent pas moins attachés à des caractéristiques d'ordre purement expérimental. La conception d'une structure discontinue de l'électricité est acceptée, mais le concept théorique d'électron ne prévaut pas encore, en 1905, sur les spécificités expérimentales de production des rayonnements électriques.

5.2.2 Townsend et les phénomènes électriques dans les gaz (1915)

Dans son ouvrage, Townsend est surtout concerné par les phénomènes électriques dans les gaz pour des pressions supérieures ou égales au millimètre de mercure, c'est-à-dire l'ionisation et les phénomènes associés. Il consacre toutefois une partie à la description des principales expériences sur les "rayons cathodiques obtenus à des niveaux de vide élevés"[55]. Il ne propose pas une classification du type de celle choisie dans l'ouvrage d'Abraham et Langevin, mais ordonne les phénomènes selon les processus à l'œuvre dans le passage de l'électricité dans un gaz : diffusion, recombinaison, collision. Des termes différents sont toutefois employés selon les conditions de production des électrons.

Ainsi, dans le chapitre XII, Cathode rays and Positive rays, il utilise l'expression "rayons cathodiques" (*cathode rays*) dans le même sens qu'Abraham et Langevin. Il apporte toutefois une distinction supplémentaire puisqu'il appelle ensuite "rayons cathodiques secondaires" ("*secondary cathode rays*") les "particules chargées négativement [émises] du métal dans toutes les directions" sous l'action de rayons cathodiques. Ces "rayons secondaires" ont les mêmes propriétés que les "rayons catho-

54. Les "*Kanalstrahlen*" ou "*Rayons de Goldstein*" furent découverts en 1886 par Goldstein et correspondent aux ions positifs qui se déplacent dans le sens opposé aux électrons. Goldstein observa ces rayons à l'arrière d'une cathode percée. Remarquons que les "rayons de Goldstein" sont classés dans la partie consacrée aux électrons, et non avec les ions.

55. Townsend (1915, p. iv) : "cathode rays [...] obtained in high vacua".

diques"[56]. La distinction est également faite en ce qui concerne l'action de la lumière ultra-violette et celle de la température. Townsend parle de "particules libérées par la lumière ultraviolette"(*particles set free by ultra-violet light*) et de "particules chargées négativement émises par les solides incandescents" (*negatively charged particles emitted by incandescent solids*). Enfin, lorsqu'il dresse un tableau récapitulatif des "déterminations précises de la valeur de e/m pour les électrons obtenus sous des conditions variées"[57], il distingue *cathode rays*, *cathode rays from glowing oxides* et *photo-electric effect*.

Townsend ne procède donc pas de la même manière qu'Abraham et Langevin. Sa classification est moins apparente, plus implicite[58]. Ceci tient en premier lieu à des objectifs et à une approche différents. Mais à nouveau, les conditions de production jouent un rôle important dans les dénominations utilisées. Lorsqu'il décrit les expériences, Townsend ne parle pas d'électrons produits dans telle ou telle circonstance, mais plutôt de particules produites selon tel ou tel mécanisme ou de rayons cathodiques.

5.2.3 Les mesures de la charge spécifique présentées par Gerlach (1926)

On trouve également une classification implicite dans le volume 22 des *Handbuch der Physik*, "*Electronen . Atome . Moleküle*". Plus précisément, le premier chapitre de ce volume est rédigé par Walther Gerlach et traite des "*Elektronen*"[59] sous deux aspects : sa charge et sa charge spécifique. L'approche développée par Gerlach est assez différente de celle de Townsend. Il présente en effet brièvement les conceptions théoriques associées à la notion d'électron et s'attache principalement aux travaux expérimentaux majeurs d'un point de vue historique et physique. Il donne, selon un ordre chronologique, les descriptions des méthodes expérimentales et les résultats.

56. Townsend (1915, p. 457) : "**311. Secondary cathode rays.** When the cathode rays fall on a metal surface, Röntgen rays are generated, also secondary rays consisting of negatively charged particles are emitted in all directions from the metal. [...] These [secondary] rays [...] [a]re of the same nature as the cathode rays [...]".

57. Townsend (1915, p.471) : "Accurate determinations of the value of e/m for electrons obtained under various conditions" . Ces distinctions étaient déjà faites au début du XX^{e} siècle comme le montrent les tableaux extraits de Lodge (1907) et Kaufmann (1901a) cité par Falconer (2001, p. 87-88).

58. Nous parlerons de classification implicite des rayonnements électriques dans les cas où elle ne constitue pas la structure de la présentation, par opposition à la classification explicite d'Abraham et Langevin.

59. Gerlach (1926).

La classification des rayonnements électroniques est implicite mais n'en demeure pas moins présente. Elle se distingue des deux précédentes par quelques précisions supplémentaires. En effet, pour Gerlach, l'expression "rayons cathodiques" (*Kathodenstrahlen*) fait référence aux électrons produits dans les conditions d'une décharge qu'il qualifie d'"autonome" (*selbständige Entladung*), comme par exemple pour l'expérience de Guye et Lavanchy. Les électrons produits par effet photoélectrique ou thermionique sont respectivement qualifiés respectivement de "photoélectrons" (*Photoelektronen*) et d'"électrons incandescents" (*Glühelektronen*).

En 1926, Gerlach est moins hésitant que Townsend en 1915 ou Abraham et Langevin en 1905 à employer le terme d'électron, alors largement accepté. Il apparaît alors d'autant plus intéressant de voir qu'il continue pourtant d'attacher une grande importance aux conditions dans lesquelles les électrons sont produits lorsqu'il décrit les expériences. Bien qu'il présente des expériences de mesure des propriétés électriques et inertielles de l'objet théorique électron, il utilise un vocabulaire en lien direct avec les conditions expérimentales dans lesquelles ont été réalisées ces mesures.

5.2.4 Une classification des décharges électriques dans les gaz

Entre 1927 et 1929 paraissent, sous la direction de Wien et F. Harms les 19 volumes des *Handbuch der Experimentalphysik* destinés à faire le point sur les aspects expérimentaux de la physique de l'époque et ses développements historiques. Chaque volume est consacré à un domaine précis de recherche et rédigé par un ou plusieurs spécialistes allemands de celui-ci.

Le volume 13 est divisé en trois sous-volumes. Les deux premiers sont consacrés respectivement à la conduction des ions dans les gaz et aux propriétés électriques des flammes, et aux électrodes chauffées et aux techniques des tubes à électrons [60]. Le troisième traite de "la décharge autonome dans les gaz" [61].

Dans ce sous-volume, Seeliger propose une introduction au phénomène général de la décharge électrique dans les gaz. Il souligne l'intérêt de mettre en place une "nomenclature unitaire", afin d'"apporter de l'ordre à l'extraordinaire diversité des différentes formes de décharges" [62]. Il affirme ensuite qu'il est possible de classer

60. *Die Ionenleitung in Gasen — Die elektrischen Eigenschaften der Flamme*, Schweidler et Becker (1928) ; et *Glühelektroden und Teschniche der Elektronenröhren*, Schottky *et al.* (1928).
61. Seeliger et Mierdel (1929).
62. Seeliger et Mierdel (1929, p. 3) : "Um in die außerordentliche Mannigfaltigkeit verschiedener Entladungsformen Ordnung bringen zu können, ist es erforderlich, eine einheitliche Nomenklatur

toutes les "décharges autonomes" selon les "connaissances certaines" des différents "mécanismes de décharge". Il rappelle cependant "l'utilité et la nécessité" de présenter l'ancienne classification, fondée sur les caractéristiques extérieures, afin de comprendre les anciens travaux qui ont souvent gardé une grande valeur [63].

La nouvelle nomenclature distingue trois types de décharges électriques : la décharge "autonome", la décharge "non-autonome" (*unselbständige*) et la décharge "semi-autonome" (*halbselbständige*).

La première est définie par opposition à la seconde comme étant "indépendante" (*unabhängig*) de moyens d'ionisation ou d'excitation du "passage de la décharge" [64]. Elle correspond donc à la décharge électrique dans sa forme la plus primitive historiquement, provoquée par une différence de tension adéquate entre deux électrodes dans un gaz à pression déterminée.

Dans le cas de la décharge non-autonome, le gaz est ionisé par des rayons X, α ou β. Pour la décharge "semi-autonome", les "porteurs de charge" sont produits par des "moyens extérieurs" [65]. C'est le cas lorsque sont utilisés les effets photo-électrique ou thermionique.

Seeliger s'intéresse à la décharge, c'est-à-dire au passage de l'électricité dans les gaz. La classification qu'il présente relève donc spécifiquement de ce domaine expérimental. Cependant, l'exemple de Gerlach montre que, en tant que mécanisme d'émission, elle est également utilisée pour décrire des expériences sur les électrons.

5.2.5 Les "Rayons Cathodiques" vus par Lenard et Becker

Le volume 14 des *Handbuch der Physik* traite des *Kathodenstrahlen*, partie rédigée par Lenard et August Becker, et des *Kanalstrahlen*, partie rédigée par Wien [66].

einzuführen [...]".

63. Seeliger et Mierdel (1929, p. 3) : "Wenn nun auch neuerdings eine solche Einteilung aller selbständigen Entladungen auf Grund einer sicheren Einsicht in den Entladungsmechanismus rationell und physikalisch begründet vorgenommen werden konnte, die von den älteren, in der Hauptsache nach äußerlichen Merkmalen und mehr nur beschreibend vorgehenden Einteilungen vielfach abweicht, ist es doch notwendig und nützlich, eine Übersicht nach Art jener älteren Methoden voranzustellen. Es wird so ermöglicht, den Anschluß an die älteren, häufig auch heute noch wertvollen Arbeiten zu finden".

64. Seeliger et Mierdel (1929, p. 3) : "Als „selbständige" Entladungen bezeichnet man alle Entladungen, die im Gegensatz zu den „unselbständigen" unabhängig von einer äußeren künstlichen Ionisierung oder Hilfserregung der Entladungsstrecke bestehen.".

65. Seeliger et Mierdel (1929, p. 3) : [...] die halbselbständigen Entladungen, bei denen ein Teil der benötigten Entladungsträger durch äußere Mittel erzeugt wird [...]".

66. Lenard *et al.* (1927).

Lenard et Becker n'utilisent pas de classification des rayonnements électroniques comme celles développées précédemment. Leur approche semble même s'en s'écarter sensiblement puisqu'ils emploient presque exclusivement l'expression "rayons cathodiques". Cette différence notable tient certainement à la personnalité de Lenard, à son caractère quelque peu égocentrique, comme le montre la description qu'il développe des savoirs généraux sur les rayons cathodiques dans le premier chapitre de l'ouvrage. Ainsi, sur 84 références au total dans ce chapitre , il se cite lui-même 45 fois. Dans l'histoire qu'il reconstruit, ses travaux sont considérés comme de la plus grande valeur aussi bien par rapport à ses prédécesseurs qu'à ses successeurs.

Pour Lenard, la valeur d'une expérience sur les rayons cathodiques tient à la possibilité de travailler de façon "pure" (*rein*). Ainsi, il souligne que, dans les expériences de Hittorf, il n'était pas possible de mener des "recherches pures"[67]. Pour Lenard, l'expression "recherche pure" signifie que les rayons cathodiques sont observés en dehors du tube à décharge dans lequel ils sont produits. Ainsi, il est possible de travailler à des pressions extrêmement faibles. En particulier, il fait référence à ses travaux sur les fenêtres métalliques à travers lesquelles il fait passer les rayons cathodiques en dehors du tube à décharge. Il rappelle que, dans un tube à très basse pression, il est impossible de produire des rayons cathodiques [68], raison pour laquelle les recherches menées jusqu'à la fin des années 1890 n'étaient pas "pures".

Cette description proposée par Lenard est faussée par sa volonté de rappeler, trente années après, l'importance de ses propres travaux. Une fois cela établi, il revient sur les mesures de la charge spécifique et de la vitesse des rayons cathodiques. Il souligne que, dans la limite des incertitudes de mesure, la charge spécifique est toujours la même. Il parle alors de "rayons cathodiques émis par effet photo-électrique" (*lichtelektrisch erzeugten Kathodenstrahlen*) ou de "rayons cathodiques produits par effet thermo-électrique" (*glühelektrisch erzeugten Kathodenstrahlen*).

Ainsi, malgré l'originalité particulière de cette présentation et l'emploi de l'expression "rayons cathodiques" généralisée à tous les rayonnements électroniques non-radioactifs, les conditions de production de ces rayonnements constituent à nouveau un critère important dans la présentation des expériences.

De plus, pour Lenard et Becker, les conditions de l'émission cathodiques sont

67. Lenard *et al.* (1927, p. 6) : "Was fehlte [...] war die Möglichkeit, reine Versuche mit Hittorfs Strahlen anzustellen".

68. Lenard *et al.* (1927, p.13) : "Ist ein Entladungsrohr aufs äußerte evakuiert, so geht die elektrische Entladung nicht mehr hindurch : Es ist unmöglich, Kathodenstrahlen im vollständigen Vakuum zu erzeugen".

utilisées comme un critère de jugement des expériences, de leur "pureté". Cet élément n'apparaissait pas dans les ouvrages précédents. La diversité des conditions dans lesquelles sont produits les électrons était prise en compte, voire utilisée comme élément de classification, mais aucun jugement qualitatif n'était émis à cet égard.

5.2.6 Retour à la présentation de Gerlach

Nous avons montré que les mécanismes de production de ce qui est, ou est en passe d'être, identifié comme des électrons constituent, pour les expérimentateurs [69], un élément important dans les présentations qu'ils font des recherches expérimentales de la fin du XIX^e siècle et du début du XX^e siècle.

Cet aspect particulier du rapport des expérimentateurs à l'objet théorique électron n'a pas été souligné par les études historiques présentées précédemment [§ 5.1]. Comment l'interpréter ? Dans le cas d'Abraham et Langevin, c'est l'universalité d'une "conception discontinue de l'électricité" qui est mise en avant. Nous pouvons alors supposer que la grande diversité des conditions dans lesquelles sont produits les électrons sert à appuyer l'hypothèse de leur universalité. A l'opposé, l'exemple de Lenard et Becker fait apparaître les différentes conditions de production de ce qu'ils appellent uniformément "rayons cathodiques" comme des *techniques* dont certaines se révèlent plus appropriées que d'autres à la recherche d'une plus grande précision expérimentale. Que penser alors de la présentation de Gerlach ?

Rappelons ce qu'il écrit dans le chapitre "Production et accélération des électrons" :

> "Les électrons dont il s'agit de mesurer la charge spécifique sont produits de nombreuses manières. La première méthode d'un point de vue historique utilise les rayons cathodiques d'une décharge autonome dans un vide élevé. Un tel rayon cathodique est constitué d'électrons de même vitesse si un potentiel de décharge constant est appliqué au tube à décharge. [...]
>
> Au lieu des rayons cathodiques d'une décharge autonome, on a utilisé les rayons cathodiques qui sont émis d'une cathode incandescente, une cathode de Wehnelt par exemple : les électrons incandescents. Ces électrons quittent la cathode avec une très petite vitesse de l'ordre de 1/100 à 1/500 de la vitesse de la lumière. Ils peuvent être accélérés par un champ électrique. De la même manière, les

69. Les ouvrages étudiés précédemment ne constituent pas réellement un ensemble cohérent d'un point de vue chronologique ou en terme de culture scientifique (France, Angleterre, Allemagne). Ceci relève d'un choix que nous avons fait de nous intéresser avant tout à la façon dont est traitée la problématique de l'émission des électrons et de montrer son importance en des lieux et des temps différents.

> rayons électroniques de plus grande vitesse seront obtenus qui sont constitués d'électrons émis par effet photo-électrique et accélérés : les photo-électrons. [...] Les rayons cathodiques d'une décharge autonome et les électrons des cathodes incandescentes ou de l'émission photo-électrique se différencient encore par le fait que les premiers n'ont pas seulement la même vitesse mais sont émis dans la même direction, alors que les autres quittent l'électrode dans toutes les directions. Il sera cependant possible de rendre parallèle le faisceau d'électrons par un fort champ électrique puisque, comme souligné plus haut, les vitesses d'émission sont très faibles."[70].

Ainsi, Gerlach souligne des différences qui auront des conséquences du point de vue des réalisations expérimentales. Par rapport aux rayons cathodiques, les électrons incandescents se prêteraient plutôt à des mesures à faible potentiel d'accélération, alors que les photo-électrons se prêteraient à des mesures à potentiel élevé. De plus, les rayons cathodiques sont émis sous la forme de faisceaux, contrairement aux autres qu'il faut accélérer suffisamment pour en faire un faisceau.

Les conditions de production des "rayons électroniques" semblent donc revêtir une importance qui n'avait pas encore été soulignée jusque là. Lenard et Becker y voyaient un critère d'appréciation des expériences. Gerlach semble y voir un critère en terme des possibilités expérimentales relatives à telle ou telle technique d'émission.

70. Gerlach (1926, p. 44-45) : "**Die Erzeugung une Beschleunigung der Elektronen**. Die Elektronen deren spezifische Ladung gemessen wurde, sind auf sehr verschiedene Weisen ausgelöst worden. Die historish erste Methode verwendet die Kathodenstrahlen einer selbständigen Entladung im Hochvakuum. Ein solcher Kathodenstrahl besteht aus Elektronen gleicher Geschwindigkeit, wenn an der Entladungsrohr konstantes Entladungspotential anliegt. [...] Statt Kathodenstrahlen einer selbständigen Entladung hat man die Kathodenstrahlen verwendet, welche von einer glühenden Elektrode, z.B. Wehnelt-Kathode, ausgehen : „Glühelektronen". Diese Elektronen verlassen die Glühkathode mit einer sehr kleinen Geschwindigkeit von rund 1/100 bis 1/500 Lichtgeschwindigkeit. Sie können durch ein elektrisches Feld beschleunigt werden. Auf gleiche Weise werden die Electronenstrahlen hoher Geschwindigkeit erhalten, welche aus beschleunigten lichtelektrisch ausgelösten Elektronen, den Photoelektronen, bestehen. [...] Die Kathodenstrahlen selbständiger Entladung und die aus der Glühkathode oder des lichtelektrischen Auslösung stammenden Elektronen unterscheiden sich noch dadurch, daß erstere nicht nur sämtlich gleiche Geschwindigkeit, sondern auch gleiche Richtung haben, während letztere aus der Elektrode nach allen Seiten austreten. Da jedoch, wie oben betont, die Austrittsgeschwindigkeit dieser Elektronen sehr klein ist, wird bei hohem beschleunigenden Felde auch eine Parallelisierung der Elektronen eintreten." La cathode de Wehnelt est une cathode mise au point par A. Wehnelt en 1904 et consistant à exploiter les propriétés d'émission électronique des oxydes métalliques sous l'effet du chauffage.

5.3 Mécanismes d'émission et mesure des propriétés électrique et inertielle des rayons cathodiques

5.3.1 Choix et présentation du corpus étudié

Les présentations analysées constituent des synthèses *a posteriori*, des tentatives pour mettre de l'ordre parmi tous les travaux expérimentaux réalisés sur les faisceaux d'électrons. Il est intéressant désormais de voir comment les expérimentateurs *en action* présentaient eux-même leurs résultats. Pour ce faire, nous étudions les recherches ayant mené à des déterminations de la charge spécifique de l'électron, ainsi que celles consacrées à l'étude de la variation de l'inertie.

Le corpus étudié comprend 21 articles : 16 sur la charge spécifique, 5 sur la variation de l'inertie. Le tableau 5.1 donne une vision d'ensemble de ces travaux.

5.3.2 Mesurer de la charge spécifique : étudier la composition des rayonnements électriques

Parmi les travaux que nous avons classés comme des mesures de la charge spécifique associée aux différents types de rayons électroniques, tous n'étaient pas *directement* conçus dans ce but. En effet, jusqu'au travail de Becker en 1905 puis ceux de Bestelmeyer en 1907 et Classen en 1908, les mesures de la charge spécifique associée aux rayonnements électroniques sont plus des moyens d'identification des rayonnements, de l'étude de leur constitution ou de leurs propriétés, que des objectifs en tant que tels. Cette remarque est également valable pour la période 1896-1900, durant laquelle seule le travail de Simon en 1899 est explicitement destiné à réaliser une mesure *précise* de la charge spécifique associée aux rayons cathodiques :

> "Quoiqu'il en soit, nous proposons de mettre en œuvre une mesure *la plus précise possible* de la valeur de ϵ/μ par une méthode de recherche définie. C'est l'objectif du travail présenté ici." [71]

Après la mesure de Simon, qui avait conclu à une valeur de $\frac{e}{m} = 1,865.10^7\ CGS$, les expériences de Seitz en 1901 sont destinées à poursuivre les recherches de Lenard sur les rayons qui traversent de fines couches métalliques. Seitz se demande en effet "de quelle nature est l'interaction" entre les "électrons et les atomes matériels ou les

71. Simon (1899, p. 589) :"Wie dem auch sei, jedenfalls ist es angezeigt, nach einer bestimmten Versuchsmethode eine *möglichst genaue* Bestimmung der Grösse von ϵ/μ durchzuführen. Das ist der Zweck der vorliegenden Arbeit [...]".

Année	Quantité mesurée	Auteur(s)	Technique d'émission
1901	mesure $\frac{e}{m}$	Seitz	rayons cathodiques
			rayons de Lenard
1902	mesure $\frac{e}{m}$	Seitz	rayons cathodiques
1903	mesure $\frac{e}{m}$	Starke	rayons de Lenard
	variation de l'inertie	Starke	rayons cathodiques
1904	mesure $\frac{e}{m}$	Wehnelt	chauffage
1905	mesure $\frac{e}{m}$	Becker	rayons de Lenard
		Reiger	rayons cathodiques
			effet photo-électrique
1906			
1907	mesure $\frac{e}{m}$	Bestelmeyer	effet photo-électrique (X)
1908	mesure $\frac{e}{m}$	Richardson	chauffage
		Classen	chauffage
1909	variation de l'inertie	Hupka	effet photo-électrique
		Guye et Ratnowsky	rayons cathodiques
1910	variation de l'inertie	Proctor	chauffage
1911	mesure $\frac{e}{m}$	Malassez	rayons cathodiques
		Bestelmeyer	chauffage
		Lerp	rayons cathodiques
1912	mesure $\frac{e}{m}$	Alberti	effet photo-électrique
1913	mesure $\frac{e}{m}$	Nathanson	chauffage
1914			
1915	variation de l'inertie	Guye et Lavanchy	rayons cathodiques
1916	variation de l'inertie	Jones	rayons cathodiques

Table 5.1 – Présentation du corpus étudié : Etudes expérimentales sur les faisceaux d'électrons artificiellement accélérés entre 1901 et 1916

molécules qui, au regard de la grande vitesse des rayons, peuvent être considérés comme immobiles" : s'agit-il de "forces de frottement" ou alors de "forces conservatives" ? Sont-elles des forces d'"attraction ou de répulsion" ? Tout ceci est "pour le moment complètement inconnu"[72]. Pour Seitz, il s'agit donc plutôt de chercher à en savoir plus sur les propriétés des électrons en interaction avec la matière que de déterminer une grandeur physique spécifique. En fait, Seitz réalise une mesure de la charge spécifique pour vérifier si les électrons qui traversent une fenêtre métallique perdent de la vitesse lors de la traversée ou pas :

> "Les mesures d'absorption précédentes laissent penser que la vitesse des particules est diminuée après la traversée d'une feuille mince. Pour éclaircir cette question, les grandeurs v et ϵ/μ sont mesurées quand les rayons viennent directement de la cathode et aussi après avoir traversé une fenêtre de Lenard dont l'épaisseur peut être modifiée. "[73]

Il étudie des rayons cathodiques émergeant d'une fenêtre de Lenard dans la même direction que les rayons incidents, mais aussi dans une direction décalée de 45 °, et enfin pour les rayons arrivant directement de la cathode. Il réalise des comparaisons non mesurées des impacts sur les écrans fluorescents après des déviations électriques ou magnétiques, desquelles il conclut que les électrons ne sont pas freinés au cours de la traversée de la fenêtre. Il ne donne à la fin de l'article qu'une valeur du couple $(\epsilon/\mu\,;\,v)$: $(0{,}645.10^7\ CGS\,;\,0{,}703.10^{10}\ cm.s^{-1})$, sans réellement justifier la présence de cette mesure dans sa recherche. Il conclut toutefois à l'identité entre ses résultats et ceux de Lenard quelques années plus tôt.

La question de savoir ce qui se passe lors de la traversée de fines couches métalliques ou lors de la réflexion[74] est à nouveau abordée par Starke en 1903, après que deux physiciens, Gehrcke et Leithäuser, ont, en 1901 et 1902, montré que la réflexion d'un rayonnement "homogène" donnait naissance à un rayonnement "inhomogène". Par rayonnement "homogène", Starke fait référence à un rayonnement

72. Seitz (1901, p. 1) : "Welche Art z. B. die Wechselwirkung ist zwischen ihnen [den Elektronen] und den materiellen Atomen oder Molecülen, welche man im Vergleich zu der grossen Geschwindigkeit der Strahlen als ruhend annehmen kann, ob man es mit Reibungskräften oder conservativen Kräften zu thun hat, ob Anziehung oder Abstossung ausgeübt wird, ist bis jetzt völlig unbekannt.".

73. Seitz (1901, p. 25) : "Da die obigen Absorptionsmessungen eine Abnahme der Geschwindigkeit der Teilchen beim Durchgang durch ein Blättchen vermuten liessen, so wurden zur Klärung dieser Frage die Grössen v und ϵ/μ gemessen, sowohl wenn die Strahlen direct von der Kathode kamen, als auch, nachdem sie ein Lenard'sches Fenster, dessen Dicke ebenfalls variirt werden konnte, passirt hatten.".

74. Les auteurs parlaient de réflexion des rayons cathodiques dans le cas de l'émission secondaire.

constitué de plusieurs "Ablenkbarkeit"[75], c'est-à-dire, comme il le précise dans son article, d'un rayonnement pour lequel la vitesse, ou la charge spécifique, ou les deux à la fois, peuvent être inhomogènes. Pour Starke, les mesures réalisées jusqu'alors sur les déviations des rayons cathodiques laissent supposer que ce n'est pas la charge spécifique qui varie, mais bien la vitesse. Son travail est destiné à montrer que tel est le cas, mais pas à proposer une nouvelle mesure de la charge spécifique.

Ceci est d'autant plus évident que les mesures qu'il réalise ne sont pas d'authentiques mesures de la charge spécifique associée aux différents rayonnements (directs, réfléchis, émergeants), mais plutôt des comparaisons avec la mesure de Simon. En effet, Starke affirme avoir ainsi "évité la détermination du champ magnétique et de son inhomogénéité" puisqu'il cherche "moins à donner une valeur absolue" que de montrer à quoi tiennent les différences de déviation observées[76]. Finalement, il constate que la charge spécifique ne varie pas, que c'est la vitesse qui est modifiée lors de la réflexion ou de la traversée.

Cette question ne sera par la suite plus soulevée. En revanche, celle de l'identité des différents rayonnements, c'est-à-dire l'hypothèse de l'électron, donne lieu à d'autre recherches. C'est le cas du travail présenté par Reiger en 1905.

> "Les substances radio-actives mises à part, toutes ces recherches traitent de rayons cathodiques qui proviennent d'un conducteur électrique. La grandeur ϵ/μ n'a encore pas été estimée pour des rayons cathodiques qui proviennent d'un isolant ou qui sont produits dans un gaz"[77]

Dans les différents cas qu'il étudie, Reiger trouve des valeurs comprises entre 0,96 et 1,68 (10^7 CGS). Il conclut que l'ordre de grandeur de ces valeurs est le même et qu'il vient ainsi d'apporter la preuve de "l'unité de l'atome d'électricité face à la multitude d'atomes matériels"[78].

75. Starke (1903a, p. 14) : "[Gehrcke und Leithäuser] zeigten, daß die von einem abgeleitetem Reflektor bezw. Metallblättchen ausgehende Diffuse Strahlung inhomogen ist, d. h. aus Kathodenstrahlen verschiedener Ablenkbarkeit besteht, auch wenn das erzeugende Kathodenstrahlenbündel von einer Influenzmaschine erzeugt wird [...]".

76. Starke (1903a, p. 19) : "Da es mir weniger auf die Bestimmung absoluter Werte als auf die Konstatierung vorhandener Änderungen der die Ablenkung bestimmenden Größen $\frac{\epsilon}{m}$ und v ankam, so umging ich die genaue Auswertung des Magnetfeldes und seiner Inhomogenität [...]".

77. Reiger (1905, p. 948) : "Sehen wir ab von den radioaktiven Substanzen, so beziehen sich alle diese Versuche auf Kathodenstrahlen, die ihren Ursprung an einem Leiter der Elektrizität nehmen. Dagegen wurde bisher niemals für Kathodenstrahlen, die von einem Isolator ausgehen, und für Kathodenstrahlen, die im Gase entstehen, das Verhältnis ϵ/μ bestimmt.".

78. Reiger (1905, p. 959) : "Überall, wo in der Natur Kathodenstrahlen auftreten, ist die Größenordnung von ϵ/μ dieselbe. Die Bedeutung dieses Satzes liegt darin, daß er den Schluß auf die Einheit des elektrischen Atoms gestattet gegenüber der Vielheit der Atome der Materie.".

Il s'agit là de la dernière expérience entreprise dans ce but. Après Reiger, les expérimentateurs auront pour objectif de mettre au point des méthodes toujours plus précises de mesure de la charge spécifique associée aux rayons cathodiques.

Ainsi, en préambule de l'historique qu'il donne des recherches sur les rayons cathodiques, Jean Malassez écrit :

> "La détermination du quotient $\frac{e}{m}$ a donné lieu à un grand nombre de mesures, en raison des conditions très nombreuses et variées dans lesquelles ces rayons cathodiques peuvent être produits.
>
> Il y avait grand intérêt, en effet, à montrer que ces rayons, malgré la diversité des conditions de leur production, étaient bien identiques les uns aux autres.
>
> Maintenant qu'il n'y a plus de doute sur l'identité des rayons cathodiques d'origines diverses, il faut surtout se préoccuper d'employer des méthodes qui présentent les meilleures garanties d'exactitude." [79]

5.3.3 Recherche de précision dans la mesure de la charge spécifique

Cette quête de précision dans la mesure de la grandeur physique permettant de caractériser la particule constituant les rayons cathodiques commence, comme nous l'avons vu avec Kaufmann en 1897 puis Simon en 1899. En 1900, plusieurs valeurs de la charge spécifique associée aux différents types de rayonnements sont publiées. Celles-ci diffèrent cependant assez largement, dans une plage allant d'environ 0,5 à 2 10^7 CGS.

Ces différences vont alimenter les recherches des expérimentateurs jusqu'en 1911. On peut citer ainsi Langevin qui, en 1905, rappelle que "[l]es résultats obtenus dans le cas des rayons cathodiques présentent des divergences assez notables quand différentes méthodes de mesure sont employées." [80]

Le premier à se pencher sur cette question est Seitz en 1902. Il affirme qu'il serait désirable d'avoir, pour les rayons cathodiques, une méthode précise de mesure de leur charge spécifique. L'intérêt serait, selon lui, de pouvoir ensuite s'en servir pour savoir si la charge spécifique varie avec la vitesse comme c'est le cas pour les rayons β. Le lien fait par Seitz est assez indirect :

> "Une méthode fiable et la plus précise possible pour la détermination du rapport de la charge à la masse d'une particule cathodique serait de la plus haute importance, après qu'il a été montré théoriquement que cette valeur, si nous considé-

79. Malassez (1911, p. 233).
80. Langevin (1905, p. 269).

> rons la masse comme apparente, définie de façon électromagnétique, doit varier nettement avec la vitesse quand elle se rapproche de la vitesse de la lumière, ce qui a été effectivement constaté dans le travail bien connu de Kaufmann sur les particules des rayons de Becquerel."[81]

Validité de la formule de Schuster

Comme cause possible des grandes différences entre les mesures réalisées jusque là, Seitz interroge la relation, proposée par Schuster en 1884, d'égalité entre l'énergie potentielle électrostatique et l'énergie cinétique acquise par les particules cathodiques entre les électrodes. Plus explicitement, il se demande si le potentiel à la cathode vaut bien $\mu v^2/2\epsilon$ (lorsque toutes les autres parties du tube sont reliées à la terre)[82]. Il propose alors de comparer trois mesures de cette grandeur, faites dans le même tube et dans des conditions similaires. Il réalise ainsi une mesure du potentiel à la cathode qu'il compare à la valeur du potentiel sous lequel sont accélérés les rayons cathodiques, déduite de l'énergie transportée (méthode de Thomson). Il compare également le potentiel mesuré à la cathode avec la valeur de $\mu v^2/2\epsilon$ déduite de la déviation électrique des rayons. Il conclut de ces mesures que l'on peut utiliser la relation de Schuster.

Il propose ensuite une mesure de la charge spécifique en mesurant le potentiel à la cathode et la déviation magnétique des rayons. Il affirme qu'il sait ne pas apporter de nouveauté, mais veut voir s'il arrive à la même valeur que Simon avec son dispositif. Il mesure $\epsilon/\mu = 1,87.10^7 CGS$, soit quasiment la même valeur que celle mesurée par Simon.

Cette question de la validité de la formule de Schuster continue néanmoins d'interroger les expérimentateurs. Ainsi J.J. Thomson avance-t-il l'idée que l'écart entre la valeur déduite des mesures de Simon et la sienne tient à l'hypothèse de Schuster, appliquée par Simon, qui ne serait peut-être pas applicable en toute rigueur. En 1905, Langevin propose alors une méthode pour vérifier cette affirmation :

81. Seitz (1902, p. 233) : "Eine möglichst genaue und zuverlässige Methode zur Bestimmung des Verhältnisses von Ladung zur Masse eines Kathodenstrahlenteilchens wäre von grösster Wichtigkeit, nachdem theoretisch nachgewiesen ist, dass diese Grösse, falls wir die Masse als sogenannte scheinbare, elektromagnetisch definirte Masse ansehen, mit der Geschwindigkeit merklich variieren muss, wenn sich dieselbe der Lichtgeschwindigkeit nähert, was auch thatsächlich fur die Teilchen der Becquerelstrahlen in der bekannten Arbeit von Kaufmannn constatirt wurde".

82. Seitz (1902, p. 234) : "So könnte es fraglich erscheinen, ob die an der Kathode gemessene Spannung (vorausgesetzt, dass alle übrigen Teile der Röhre mit der Erde verbunden sind) thatsächlich gleich der Grösse $\mu v^2/2\epsilon$ gesetzt werden darf.".

> "Un moyen de trancher la question consiste, après leur production, à faire subir aux rayons cathodiques une chute de potentiel supplémentaire et connue, et à mesurer, par la modification qui en résulte dans leur déviation magnétique, la chute de potentiel initiale sous laquelle ils ont été produits." [83]

Cette méthode sera mise en application par Malassez la même année. Il conclut à la validité de la formule de Schuster et de l'hypothèse sous-jacente :

> "[C]es résultats permettent d'établir que les corpuscules sont bien émis sous la différence de potentiel existant réellement entre la cathode et l'anode, et que c'est à partir de la surface même de la cathode qu'il reçoivent du champ intense l'énergie cinétique correspondante." [84]

En 1908, Classen propose une mesure de la charge spécifique en utilisant des rayons émis par chauffage de la cathode [85] et accélérés sous un potentiel de 1000 V environ. Il utilise la formule de Schuster combinée à la déviation magnétique des rayons et trouve $\frac{\epsilon}{\mu} = 1{,}776\ CGS$. Cette valeur sera par la suite souvent considérée comme la plus probable.

Cependant, trois ans plus tard, la validité de la formule de Schuster est à nouveau interrogée. Malassez revient sur sa publication de 1905 et propose des expériences plus précises pour confirmer cette formule. Il réalise également une nouvelle mesure de la charge spécifique associée aux rayons cathodiques. Il trouve 1,769 CGS.

Toujours en 1911, Bestelmeyer et Karl Th. Lerp publient des travaux destinés à identifier clairement les sources d'erreurs dans les mesures antérieures à celle de Classen, et particulièrement dans les travaux de Kaufmann et Simon. Le premier propose trois sources d'incertitudes : "la validité de l'équation énergétique", "le calcul de l'intégrale de champ magnétique" et "l'estimation du rayon de courbure des rayons déviés" [86]. Le second [87] en étudie davantage : l'influence du champ magnétique terrestre, la divergence des rayons cathodiques, une éventuelle charge électrique sur l'écran fluorescent, l'équation énergétique, l'influence de la pression dans le tube.

83. Langevin (1905, p. 270).
84. Malassez (1905, p. 886).
85. Pour être plus précis, il reprend les considérations développées par Wehnelt en 1903 et 1904. Celui-ci montre en effet que l'émission de rayons cathodiques très lents est facilitée en chauffant une cathode de platine sur laquelle est déposé avec un pinceau pointu ("spitzen Pinsel") un peu de nitrate de calcium. Ce type de cathode sera par la suite appelé "cathode de Wehnelt".
86. Bestelmeyer (1911, p. 910) : "Die Gültigkeit der bekannten Energiegleichung" ; "Die auswertung des magnetischen Wegintegrals" ; "Die Bestimmung des Krümmungsradius der abgelenkten Strahlen".
87. Bestelmeyer (1911, p. 916) nous apprend que Lerp et lui travaillent en fait ensemble pour mener à bien les expériences.

Lerp conclut que la formule de Schuster ("l'équation énergétique") n'est pas à remettre en cause comme source d'erreur pouvant expliquer les différences entre les mesures de Simon et celles de Classen. En fait, seules la divergence des rayons cathodiques et la mesure du champ magnétique lui semblent pouvoir causer ces différences.

Il concède toutefois que les mesures de Simon (et de Becker[88]) sont entachées d'incertitudes "dont la cause ne se laisse pas aisément estimer avec certitude"[89]. De même mais de façon plus tranchée, Bestelmeyer conclut :

> "Du fait de l'incertitude rappelée et connue dans les fondements des calculs, la méthode simple de mesure de la charge spécifique à partir du potentiel de décharge semble de façon générale ne plus convenir pour déterminer $\frac{\epsilon}{\mu}$ selon des exigences d'aujourd'hui. Peut-être devra-t-on avant cela attendre au contraire de ces expériences une connaissance certaine de la production des rayons cathodiques."[90]

Il apparaît ainsi qu'après une décennie de recherches, la question de la validité de la formule de Schuster se pose toujours. La conclusion de Bestelmeyer semble même suggérer que la connaissance théorique des processus de l'émission cathodique est en fait, en 1911, encore trop limitée pour permettre d'améliorer encore la précision des expériences.

Améliorer les conditions expérimentales

L'étude des expériences menées dans le but de mesurer la charge spécifique associée aux rayons cathodiques montre que les recherches ne portent pas que sur la formule de Schuster et la compréhension des mécanismes de l'émission électronique.

L'autre point régulièrement abordé par les expérimentateurs est celui, que nous avons déjà soulevé avec Lenard, de la "pureté" (*Reinheit*) des conditions expérimentales. En particulier, c'est la question de l'interaction entre les rayons cathodiques

88. Lerp s'intéresse également à la fin de son travail aux mesures de Becker en 1905. Celui-ci travaille sur les rayons de Lenard, mesure la déviation magnétique et le potentiel à la cathode, et trouve une valeur de 1,847 *CGS*.

89. Lerp (1911, p. 51) : "[...] so muss man notwendigerweise schliessen, dass bei den Arbeiten S. Simons und A. Beckers noch irgend welche andere Fehlerquellen vorliegen, deren Art sich nachträglich nicht mit Sicherheit bestimmen lässt".

90. Bestelmeyer (1911, p. 929-930) : "Infolge der besprochenen und bekannten Unsicherheit der Berechnungsgrundlage erscheint die einfache Methode der Bestimmung der spezifischen Ladung aus dem Entladungspotential überhaupt nicht mehr geeignet, den heute an eine $\frac{\epsilon}{\mu}$-Bestimmung zu stellenden Anforderung zu genügen. Eher wird man vielleicht umgekehrt aus solchen Versuchen einen gewissen Aufschluß über die Entstehung der Kathodenstrahlen erhoffen dürfen".

et l'air résiduel qui est soulevée.

Lenard avait déjà fait sien cet argument pour mettre en avant sa technique d'étude des rayons cathodiques en dehors de l'enceinte de production. En 1905, Becker reprend cette technique des rayons de Lenard. Ainsi, après avoir rappelé les résultats antérieurs, Becker se livre à une critique des expériences de Simon en 1899 et de Seitz en 1902. Selon lui, les expériences de Simon étaient critiquables du fait de l'utilisation sans vérification de la relation de Schuster. Il avance alors que Seitz a montré, quelques années après, la validité de cette relation. Mais il critique cette dernière expérience sur le fait que son auteur ne s'est pas réellement demandé quelle pouvait être l'influence de l'air résiduel dans le tube, quelles complications cela pouvait poser [91].

Becker propose alors une expérience conduite dans des "conditions pures", c'est-à-dire dans un vide total :

> "C'est pourquoi je trouvais important d'apporter une nouvelle estimation précise de ϵ/μ, réalisée dans des conditions expérimentales pures — dans un vide complet — selon une méthode indépendante de la connaissance du potentiel à la cathode" [92]

La technique des rayons de Lenard sera toutefois abandonnée par la suite, puisqu'il "semble [...] qu'on ne puisse pas attendre une bien grande précision des mesures faites sur les rayons de Lenard, probablement à cause de la difficulté d'obtenir un faisceau bien défini", ainsi que l'avance Malassez [93].

Par la suite, en 1907, Bestelmeyer propose de travailler avec des rayons émis lors de l'impact de rayons X sur un métal. À nouveau, il justifie l'emploi de cette technique par la recherche de conditions expérimentales "pures" [94].

91. Becker (1905, p. 383) : "Danach schien die Frage nach dem wahren Wert von ϵ/μ, die sich beim Überblicken aller vorgenannten Resultate und ihrer großen Schwankungen aufdrängt, zugunsten des Wertes $1,865 \times 10^7$ erledigt, wenn nicht Hr. Seitz auf Störungen hinweisen müßte, die in seinen Beobachtungen im gaserfülltem Raum auftreten, und deren völlige Beseitigung oder Elimination in Frage zu stellen wäre".

92. Becker (1905, p. 383) : "Ich fand es deshalb für wichtig, eine nochmalige exakte Bestimmung von ϵ/μ unter reinen Versuchsbedingungen — im völligem Vakuum — vorzunehmen nach einer Methode, die von der Kenntnis des Kathodenpotentials unabhängig ist.". Notons que Becker s'attaque donc aussi bien à la question des conditions de l' expérience qu'aux doutes sur la validité de la formule de Schuster.

93. Malassez (1911, p. 252).

94. Notons que la définition de la "pureté des conditions expérimentales" (*die Reinheit der Versuchsbedingungen*) chez Bestelmeyer est plus large que celle de Becker et Lenard. Il intègre en effet à cette expression, en plus du "haut vide" (*hoch Vakuum*), l'observation photographique, la simplicité et la clarté de l'expérience. Voir Bestelmeyer (1911, p. 441).

> "[...] des rayons cathodiques émis de la sorte offrent la possibilité d'une détermination de ϵ/μ dans des conditions très pures." [95]

Dans les travaux de Becker et Bestelmeyer, la technique d'émission des rayons est liée à la pureté des conditions expérimentales par la possibilité d'observer les rayons à très basse pression.

Cette question de la pression résiduelle dans les tubes est soulevée lors de la discussion [96] qui fait suite à l'annonce de ses résultats par Classen en 1908. Les intervenants sont Seitz, Stark, Bestelmeyer, Marx et Jentzsch qui comptent alors parmi les spécialistes des questions liées au rayonnement cathodique en Allemagne. La première question est posée par Seitz et concerne précisément la pression dans le tube : "War das Vakuum in der Röhre sehr hoch ?". Il poursuit en ajoutant que si ce n'est pas le cas, les rayons peuvent être ralentis par le gaz résiduel. Classen répond que tel est bien le cas.

Quelques années plus tard, en 1912, Alberti propose une technique différente et en précise les avantages. Là encore, le degré de vide dans le tube revêt une importance particulière.

Il travaille alors avec des rayons émis par effet photoélectrique. Il nous dit que :

> "Par rapport aux autres méthodes, le travail avec des rayons cathodiques photoélectriques présente l'avantage que l'on a affaire à des rayons très homogènes, que leur vitesse initiale est négligeable devant un potentiel d'accélération de 10000 Volts, et que l'on travaille sous un vide très élevé." [97]

Mais il n'oublie pas de relever les inconvénients qui tiennent selon lui au faible courant électronique produit, ce qui a des conséquences sur le reste de l'expérience, en particulier ce qui implique de travailler sous des potentiels élevés. Il justifie finalement son choix comme un choix rationnel entre certains avantages et certains inconvénients :

> "Les avantages de la méthodes sont toutefois si conséquents que c'est aussi dans l'intérêt d'une meilleure précision de la valeur de e/m_0 qu'une nouvelle détermination est entreprise." [98]

95. Bestelmeyer (1911, p. 429) : "[...] dann aber bieten die so erzeugten Kathodenstrahlen die Möglichkeit der Bestimmung von ϵ/μ unter sehr reinen Verhältnissen".
96. Classen (1908, p. 764-765).
97. Alberti (1912, p. 1133) : "Das Arbeiten mit photoelektrischen Kathodenstrahlen hat den anderen Methoden gegenüber den Vorteil, daß man es mit sehr homogenen Strahlen zu tun hat, daß sie eine Anfangsgeschwindigkeit besitzen, die gegen ein beschleunigendes Potential von 10000 Volt ganz zu vernachlässigen ist, und daß man im höchsten Vakuum arbeitet".
98. Alberti (1912, p. 1133) : "Trotzdem sind die Vorteile der Methode wohl so bedeutend,

Conclusion

Les expérimentateurs de la première décennie du XX*e* siècle se posent encore des questions de fond sur la production de ce que nous appelons indifféremment rayons cathodiques. L'étude des recherches sur la mesure de la charge spécifique associée à ces rayons montre ainsi qu'assez rapidement après s'être accordés sur l'identité de nature des différents types de rayonnement, ces pionniers de la physique des particules se mettent en quête de toujours plus de précision.

Il apparaît que les mécanismes de production jouent un rôle important dans cette recherche. D'une part, on interroge la validité de l'hypothèse de Schuster selon laquelle les rayons cathodiques sont produits à la cathode, mais aussi la possibilité d'appliquer cette hypothèse aux différents types de rayons. D'autre part, le choix de la technique de production a des effets plus ou moins souhaitables sur la mise en œuvre de l'expérience : pression dans les tubes, potentiel entre les électrodes ou encore définition et netteté du faisceau.

Ainsi, la question du mode de production des rayons cathodiques apparaît désormais comme une question centrale puisqu'à travers elle, les expérimentateurs se confrontent non seulement à des problèmes purement expérimentaux, mais également aux limites des descriptions théoriques des phénomènes qu'ils observent, produisent et analysent.

Dans le paragraphe suivant, nous étudions les travaux consacrés à l'étude de la variation de l'inertie des électrons sous l'angle des techniques d'émission.

5.3.4 Etude de la variation de l'inertie des électrons artificiellement accélérés : débat autour des techniques de production

Nous avons vu au paragraphe 4.2.3.1 que Guye place son expérience face à celles de Proctor et Hupka sur la question de la technique de production des rayons cathodiques. Rappelons ce qu'il nous dit en 1916 :

> " soit M. Proctor, soit M. Hupka n'ont obtenu leurs grandes vitesses qu'en éclairant la cathode avec un faisceau de lumière ultraviolette"[99]"

Suite à l'étude menée précédemment, nous savons que le choix de la technique de production des rayons cathodiques a des implications sur la réalisation de l'ex-

daß auch im Interesse größter Genauigkeit des Wertes e/m_0 eine Neubestimmung angebracht ist".

99. Guye et Lavanchy (1916, p. 357 ; note 2).

périence. Le positionnement de Guye se situe-t-il dans cette optique ? Comment se positionnent alors Hupka et Proctor, ainsi que Starke en 1903 et Jones en 1916 ?

Mesure de Starke en 1903

Starke est le premier à étudier la variation l'inertie sur les rayons cathodiques [100]. La raison qu'il avance alors est de compléter les travaux entrepris deux ans plus tôt par Kaufmann sur les rayons β. Celui-ci avait montré que le quotient $\frac{\epsilon}{\mu}$ n'est pas constant "comme pour les rayons cathodiques" mais varie avec la vitesse. Starke veut vérifier si cela se vérifie aussi dans le domaine de vitesse des rayons cathodiques [101].

Nous comprenons mieux la question posée par Starke après l'étude menée au paragraphe précédent. En 1903, il est en effet encore légitime de se demander si ce que l'on observe pour le rayonnement β sera observé pour les rayons cathodiques. Rappelons-nous que des expérimentateurs se demandent jusqu'en 1905 si tous les rayonnements électroniques sont constitués de la même particule.

De plus, à part ce choix du type de rayonnement, Starke ne justifie pas la techniques de production des rayons. À nouveau, cela se comprend si l'on se souvient que les débats sur les avantages et inconvénients d'une technique donnée n'apparaissent vraiment qu'après 1905, après que plusieurs moyens de production réellement efficients ont été mis au point [102].

Finalement, Starke ne peut que conclure à une variation effective de la masse inertielle avec la vitesse, tout en regrettant ne pas avoir pu travailler à des vitesse suffisantes du fait de l'extrême complexité à maîtriser la décharge pour des potentiels supérieurs à 40 kV [103].

100. Starke (1903b)

101. Starke (1903b, p. 241) : "Es [...] stellte sich das interessante Resultat heraus, daß $\frac{\epsilon}{\mu}$ sich nicht, wie man es von den Kathodenstrahlen her kannte, als konstant, sondern in hohem Maße von der Geschwindigkeit abhängig erwies [...]"; Starke (1903b, p. 243) : "Im folgenden ist die Frage der Untersuchung unterworten, ob auch in dem Bereiche von Elektronengeschwindigkeiten, wie sie die Kathodenstrahlen besitzen, die Konstanz des Produktes $\frac{\epsilon}{\mu}\psi(\beta)$ besteht". Starke écrit en effet $\frac{\epsilon}{\mu} = \frac{\epsilon}{\mu_0}\frac{4}{3}\frac{1}{\psi(\beta)}$, comme il est d'usage courant à l'époque.

102. L'émission par effet thermionique n'est érigée en technique de production qu'après les travaux de Wehnelt en 1904. L'utilisation de l'effet photoélectrique n'est quant à elle pas utilisée en tant que technique avant 1909 par Hupka. Enfin, l'utilisation d'une fenêtre de Lenard, qui est plus une technique d'étude des électrons qu'une technique de production, est à l'époque sujette à caution car on ne sait alors pas très bien si les rayons incidents ne sont pas modifiés à la traversée.

103. Starke (1903b, p. 249) : "Von allergrößtem Interesse wäre es, die Untersuchung auf höhere Entladungspotentiäle auszudehnen. Trotz vieler Bemühungen mit verschiedenen geformten Entladungsröhren (Kathoden, Elektroden-distanzen und Rohrweiten verschiedenster Größe) ist es mir indessen nicht gelungen, bei höheren Potentiälen als den angegebenen kontinuierliche Entladungen

Il faut attendre six années de plus et les travaux de Hupka, Guye et Ratnowsky, et Proctor pour que la mesure de la variation de l'inertie avec la vitesse soit à nouveau effectuée sur des rayons cathodiques.

Mesure de Hupka en 1909

Dans sa première publication en mai 1909 [104], Hupka explicite le choix de travailler sur des électrons émis par effet photoélectrique par rapport aux travaux précédents de Kaufmann et Bucherer qui ont eux travaillé avec des rayons β.

> "Messieurs Kaufmann et Bucherer ont travaillé avec les rayons β de sels de radium ; en revanche les mesures présentées ici, déjà en cours avant la publication de Monsieur Bucherer, ont été menées sur des électrons produits par effet photoélectrique et accélérés par un champ statique." [105]

Dans sa publication suivante, plus détaillée, Hupka ne se situe plus uniquement par rapport aux travaux sur les rayons β mais fait référence aux précédents travaux de Starke sur les rayons cathodiques [106]. Il rappelle que celui-ci n'avait pas pu, avec une "décharge autonome" [107], travailler sur un intervalle de vitesse suffisamment étendu. Il affirme alors que grâce aux évolutions techniques dans le domaine du vide il est possible d'accélérer les rayons cathodiques sans craindre les difficultés liées au passage d'une décharge électrique dans le tube [108].

Alors,

> "un courant d'électrons est produit par effet photoélectrique puis est porté à des vitesses considérables par des potentiels élevés." [109]

zu erhalten. Bei etwa 40 000 Volt fing unter allen Verhältnissen die Entladungen zu flimmern an".

104. Hupka (1909).

105. Hupka (1909, p. 249) : "Die Herren Kaufmann und Bucherer haben mit β-Strahlen von Radiumsalzen gearbeitet ; im Gegensatz hierzu sind die im folgenden mitgeteilten Messungen, welche bereits vor der Publikation der Arbeit des Herrn Bucherer im Gange waren, an lichtelektrisch ausgelösten, durch statische Felder beschleunigten Elektronen ausgeführt worden".

106. Le choix de Hupka de travailler sur les rayons cathodiques, contrairement à ses deux prédécesseurs, trouve certainement sa cause dans la volonté de proposer une méthode expérimentale différente. En effet, la vitesse des rayons cathodiques est homogène alors que les rayons β sont des électrons émis à des vitesses différentes. Le choix de Hupka est donc bien différent de celui de Starke. En 1909, il ne fait plus de doute que ce sont les mêmes particules qui constituent les deux types de rayonnement.

107. Hupka (1910a, p. 171).

108. Hupka (1910a, p. 171)" : [...] dagegen gestattete die Vollkommenheit der modernen Evakuationsmethoden die Anwendung hoher statische Spannungen zur Beschleunigung der auf irgend eine Weise einmal erzeugten Kathodenstrahlen, ohne daß man eine sichtbare Entladung und die damit verknüpften Komplikationen zu befürchten hatte".

109. Hupka (1910a, p. 171) : "Ein Elektronenstrom wurde lichtelektrisch ausgelöst und dann durch hohe Spannungen auf erhebliche Geschwindigkeiten gebracht".

Mesure de Proctor en 1909

On retrouve le même type d'argumentation chez Proctor en 1910. Celui-ci précise en effet qu'il est nécessaire que la "décharge se produise dans un vide le plus élevé possible, quelque soit le potentiel de décharge". Il faut donc, comme nous l'avons vu, que l'émission soit produite par "des moyens externes" [110]. On retrouve donc chez Proctor la même importance accordée à l'obtention d'un vide très élevé que chez Hupka.

Il continue en suggérant deux façons possibles de procéder : utiliser la lumière ultra-violette ou une cathode de Wehnelt [111]. Pour sa part, il commence en essayant la première technique mais n'arrive pas à produire de faisceau [112]. Il ne comprend pas la raison de cet échec et se tourne alors vers la seconde technique pour laquelle "il n'y a pas de difficulté à obtenir une décharge suffisante" [113].

Les deux auteurs précédents présentent la production de rayons cathodiques de grande vitesse comme reposant sur la possibilité de travailler à de très basses pressions. Pour eux, la décharge autonome susceptible de se produire dans les tubes est un phénomène à éviter.

Le contraste avec les travaux successifs de Guye et de ses étudiants en est d'autant plus frappant puisque le physicien genevois présentait ses expériences comme n'ayant pas *nécessité* de tels moyens d'excitation externes.

Mesure de Jones en 1916

Le dernier travail sur les rayons cathodiques que nous avons étudié est celui d'un Américain, Jones, en 1916. Comme Guye, il travaille avec des rayons émis dans le cadre d'une décharge autonome. Mais, à la différence des autres travaux sur les rayons cathodiques, il utilise une source de tension variable pour produire la décharge. Le faisceau cathodique n'est alors pas de vitesse homogène. Il ne donne pas plus de précision sur l'émission des électrons [114].

110. Proctor (1910, p. 54) : "That the discharge may take place in the highest possible vacuum, whatever the discharge potential, a condition clearly desirable if not essential, it is necessary to excite it by external means".
111. "Two such means suggest themselves — ultraviolet light and the Wehnelt cathode." (Proctor, 1910, p. 54)
112. Proctor (1910, p. 54) : "[...] the discharge produced by [ultra-violet light] was insufficient to cause the screen to fluoresce even at high discharge potentials".
113. Proctor (1910, p. 55) : "In subsequent work a Wehnelt cathode will be employed as experiment shows that there is no difficulty in obtaining a sufficient discharge from it".
114. Jones (1916).

Conclusion : des "modes de production" à des "techniques d'émission" des rayons cathodiques

L'étude menée au cours de cette partie trouve son origine dans nos difficultés à réaliser l'émission cathodique avec le tube de Guye et Lavanchy. Face à un phénomène que nous n'avions pas envisagé au départ, nous sommes retournés aux textes originaux puis avons étendu notre analyse aux publications contemporaines à celles de Guye traitant de sujet expérimentaux proches. Nous avons alors mis en évidence l'existence d'une problématique spécifique à l'étude des rayons cathodiques qui n'avait jusqu'alors pas fait l'objet d'études historiques, leur production.

Jusqu'en 1905, il n'y a pas unanimité sur l'hypothèse de l'identité des rayons cathodiques émis dans différentes conditions. Des études sont en effet réalisées dans le but explicite d'étudier la composition de ces différents rayons. L'accord parmi les expérimentateurs ne semble être achevé qu'après cette date.

Notre étude apporte donc de ce fait un argument supplémentaire et nouveau à la remise en question de l'expression "découverte de l'électron" entendue comme située dans le temps et l'espace [115].

Après 1905 cependant, si les expérimentateurs ne cherchent plus à confirmer l'hypothèse de l'identité de constitution des rayons cathodiques émis dans différentes conditions, selon divers *modes de production*, ils continuent d'accorder une grande importance à la façon dont sont émis ces rayons.

En effet, le choix d'un mode de production a des conséquences sur le déroulement de l'expérience, la vitesse des rayons, la pression dans le tube, *etc.* La recherche de précision dans la détermination de la charge spécifique associée aux rayons cathodiques amène les expérimentateurs à réfléchir à ces modes de production comme à des techniques plus ou moins appropriées [116]. Un débat implicite se met alors en place où chacun avance ses arguments pour justifier l'utilisation du mode de production des rayons.

Cette réflexion sur le choix de telle ou telle façon de produire l'objet physique que l'on veut observer ou utiliser — les rayons cathodiques — est nouvelle chez ces

115. "La découverte de l'électron par J. J. Thomson en 1897".

116. C'est à cette période qu'est ainsi mise au point la technique qui supplantera toutes les autres à partir de 1920, l'utilisation d'un filament chauffé comme source d'électrons. Il s'agit de la cathode mise au point en 1904 par Wehnelt. D'autre types de tubes à filament chauffé seront mis au point par la suite. Ce seront par exemple les tubes à électrons utilisés en particulier pour la production contrôlée de rayons X.

premiers physiciens des particules. Elle se retrouve par la suite chez les auteurs des années 1920, bien conscients de l'importance que revêtait cette question autour de 1910.

La période 1904-1916 apparaît alors comme un moment particulier de l'histoire de la physique expérimentale des faisceaux d'électrons, d'une richesse jusqu'alors négligée. C'est en effet le moment où se substituent aux différents "modes de production" des "techniques d'émission", et où l'objet "rayons cathodiques" devient "faisceau d'électrons"[117]. Ces faisceaux d'électrons peuvent alors être étudiés en tant que tels, comme dans le cas des mesures de leur charge spécifique, ou bien pour comprendre des lois physiques générales, comme dans le cas des mesures sur la variation de l'inertie avec la vitesse.

Cette relecture de l'histoire des rayons cathodiques sous l'angle de leurs différents moyens de production renforce l'hypothèse principale avancée au cours de ce travail, selon laquelle il est nécessaire de replacer les expériences de Guye dans leur contexte expérimental propre si l'on veut comprendre les raisons objectives de leur acceptation. De façon plus précise, nous avons mis en évidence une problématique expérimentale, les techniques d'émission de particules, au cœur de toutes les expériences de dynamique électronique menées dans les deux premières décennies du XX^{e} siècle. La prise en compte de cette problématique nous conduit à envisager les publications originales de Guye comme contenant des arguments implicites destinés à montrer à ses lecteurs la qualité expérimentale de ses travaux. En exhibant des clichés de grande taille et bien définis et en insistant sur le nombre très important de déterminations réalisées, Guye montre qu'il maîtrise le phénomène d'émission cathodique. Ses arguments sont immédiatement reconnaissables par les expérimentateurs qui lisent et évaluent ses recherches.

117. Notons que certains expérimentateurs, dont Guye, continuent d'employer l'expression "rayons cathodiques". Cela tient certainement à une inertie de langage, mais également au fait que cette expression fait référence à une technique d'émission particulière.

Conclusion

Entre 1907 et 1915, dans son laboratoire de l'Université de Genève, Charles-Eugène Guye dirige deux séries d'expériences dans lesquelles il mesure la variation de la masse des électrons en fonction de leur vitesse. La première est réalisée en collaboration avec l'un de ses étudiants, Simon Ratnowsky, dans le but de départager deux prédictions théoriques résumées par les formules dites d'Abraham et de Lorentz-Einstein. Après trois années, Guye et Ratnowsky interprètent leurs mesures comme défavorables à la première, sans toutefois être en mesure d'affirmer la validité de la seconde. Aussi, en 1913, Guye reprend le dispositif et la méthode afin d'obtenir une "vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein". Associé à un nouvel étudiant, Charles Lavanchy, il modifie l'expérience originale de manière à en faciliter la mise en œuvre et améliorer la précision. La méthode est adaptée en conséquence. Deux ans plus tard, ils annoncent des résultats en accord précis avec la formule de Lorentz-Einstein. En 1921, Guye reprend les publications finales des deux expériences et les unit au sein d'un *Mémoire* dans lequel il propose, en plus, les "diverses données d'expériences qui ont servi à établir les tableaux définitifs"[118] déjà publiés. À cette occasion, il propose une interprétation nouvelle des résultats annoncés dès 1915, selon laquelle la vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein est en réalité une "*vérification expérimentale indirecte de premier ordre de la relation* $mV^2 = E$ *qui réunit en un seul principe le principe de la conservation de l'énergie et celui de la conservation de la matière*"[119].

Lorsque Guye envisage de réaliser l'étude expérimentale de l'"inertie électromagnétique des rayons cathodiques de grande vitesse"[120], certainement entre 1906 et 1907, il pense son travail dans le cadre des théories sur la constitution de l'électron. L'objet est de savoir si l'électron est sphérique et indéformable comme le suppose

118. Guye (1921, p. 276).
119. Guye (1921, p. 286 ; italiques originales).
120. C'est le titre de sa première présentation sur le sujet, le 1^{er} juillet 1909 (Guye et Ratnowsky, 1909).

Abraham, ou bien s'il est sphérique au repos et subit la contraction de Lorentz lorsqu'il est en mouvement. Ce n'est que par étapes qu'il intègre à son discours des considérations liées à la théorie de la relativité. Ainsi, les publications auxquelles donnent lieu la première expérience, entre 1909 et 1911, ne font qu'admettre que la théorie de Lorentz est en accord avec le principe de relativité. Mais Guye rencontre Einstein à plusieurs reprises entre 1909 et 1910, à Zurich, Genève — où est remis en juillet 1909 à Einstein le doctorat *honoris causa* proposé par Guye — ou Neuchâtel. Les deux hommes entretiennent également une correspondance dans laquelle Einstein manifeste de l'intérêt pour le travail de Guye et Ratnowsky. Ainsi, au cours de la seconde expérience, l'attitude de Guye vis-à-vis de la théorie de la relativité restreinte se modifie légèrement. Il la *distingue* plus nettement de la théorie de Lorentz. Désormais, il affirme qu'Einstein a montré que le principe de relativité conduit aux mêmes formules que la théorie de Lorentz. Malgré cela, il continue à n'interpréter ses résultats expérimentaux que comme vérification d'une formule mathématique. Il ne prend partie ni pour l'une ni pour l'autre des théories. En fait, ce n'est qu'après sa dernière publication avec Lavanchy que Guye s'affiche comme partisan de la théorie de la relativité restreinte, à travers des conférences sur les conséquences du "principe de relativité" (1917), une publication de tables numériques pour le "calcul des masses longitudinales, transversales et cinétiques dans la relativité" (1918), ou encore en invitant Einstein à venir donner des conférences à l'Université (1920).

L'évolution intellectuelle de Guye le conduit donc à réinterpréter de façon continue des résultats expérimentaux toujours (plus ou moins) favorables à la même formule théorique. Initialement conçues pour départager des théories électroniques, ses expériences sont finalement considérées comme une vérification de la formule de Lorentz-Einstein, elle-même comprise en 1921 comme n'étant qu'"une des conséquences du principe de relativité" [121].

Suivre ce travail sur l'inertie des électrons entre 1907, début des expériences, et 1921, interprétation nouvelle des résultats, revient ainsi à montrer comment s'est construite, du point de vue de Guye, la "vérification expérimentale de *l'une des conséquences de la théorie de la relativité restreinte*".

L'expérience de Guye et Ratnowsky n'est considérée comme preuve de la formule de Lorentz-Einstein ni par ses auteurs ni par les autres physiciens. Elle constitue en fait le support, la première phase, de la vérification à laquelle aboutissent Guye et Lavanchy quelques années plus tard. Ceux-ci affirment avoir "amélioré" le dispositif

121. Guye (1921, p. 285).

original de manière à obtenir une meilleure précision. De leur point de vue, le succès est complet. Les quelques 2000 mesures effectuées s'accordent, *en moyenne*, avec une "très grande exactitude" [122] à la formule théorique. La réception de leur conclusion est unanime. L'expérience "très soigné[e]" [123] de Guye et Lavanchy constitue la vérification "la plus précise de toutes" [124] de la formule de Lorentz-Einstein, elle "ne peut pas être surpassée" [125]. Aucune critique à leur égard n'est formulée, elle ne donne lieu à aucun débat, aucune passe d'armes, contrairement à ce qui s'était produit entre 1906 et 1910 suite aux publications de Kaufmann, Bucherer et Hupka, dont les dispositifs, les méthodes d'analyse et les résultats avaient alors été analysés en détail et de façon acérée [126]. À chaque fois, de nouvelles expériences étaient demandées qui résoudraient les défauts et les erreurs mis en évidence par la critique.

De façon générale, toutes ces expériences se ressemblent. Des électrons se déplacent dans une enceinte sous vide et sont déviés par un champ électrique et/ou un champ magnétique. Les déviations sont observées sur un écran, directement ou grâce à un enregistrement photographique. Les critiques soulignent plusieurs aspects qu'il faut améliorer. Le vide dans l'enceinte doit être le plus poussé possible [127]. Le dispositif doit permettre de réaliser des enregistrements photographiques rapides de façon à éliminer les variations parasites inévitables [128]. Ces enregistrements doivent être d'une grande netteté et de taille suffisante de sorte que les mesures sur ces images ne posent pas de problème de précision [129]. La méthode expérimentale doit être soigneusement choisie de sorte que ni la dimension ni la géométrie du dispositif n'entre en compte dans l'analyse des mesures [130]. Elle doit également permettre de s'affranchir de mesures trop délicates pour être effectuées avec une précision suffisante [131]. Enfin, le nombre de mesures ne peut se limiter à quelques clichés [132].

De fait, à la fin des années 1900, alors que la relativité restreinte est en cours d'élaboration et fait l'objet de débats théoriques quant à son interprétation, l'arène expérimentale est en effervescence. Les historiens considèrent que la théorie d'Einstein ne pose plus problème à partir de 1911. Elle a alors acquis un cadre formel

122. Guye et Lavanchy (1915c, p. 55).
123. Langevin (1950a, p. 456).
124. Lettre d'Einstein à Guye, le 18 avril 1922.
125. Lettre de Starke à Guye, le 29 décembre 1922.
126. Voir paragraphes 1.6.2.1 et 1.6.2.2.
127. Critique de Bestelmeyer et Planck à Kaufmann.
128. Critique de Bestelmeyer à Kaufmann et Bucherer.
129. Critique de Lewis à Kaufmann, et de Bestelmeyer à Bucherer.
130. Critique de Bestelmeyer à Bucherer.
131. Critique de Heil à Hupka.
132. Critique de Bestelmeyer à Bucherer.

cohérent, les débats entre théoriciens se concentrent sur la physique microscopique. Cela ne clôt pas pour autant la question de sa vérification expérimentale, même si l'enjeu est incontestablement moins critique qu'auparavant. Les théoriciens sont encore en attente d'un argument obtenu dans les laboratoires, les expérimentateurs sont face à un problème non résolu. Neumann en 1914, puis Guye et Lavanchy en 1915, apportent la réponse attendue. Presque dix ans après les conclusions de Kaufmann, la formule de Lorentz-Einstein sur la variation de l'inertie des électrons avec leur vitesse est finalement vérifiée.

L'expérience qu'il réalise avec Lavanchy apporte à Guye une reconnaissance telle qu'il fait figure, dans les années 1920, d'expérimentateur de tout premier plan à l'échelle européenne. Il devient alors membre des plus hautes institutions scientifiques européennes dans lesquelles il côtoie les physiciens les plus renommés de l'époque. Ses conclusions sur la formule de Lorentz-Einstein sont reprises dans de très nombreux ouvrages de diffusion et d'enseignement de la théorie de la relativité restreinte, sa correspondance montre qu'elles sont connues et louées à travers toute l'Europe. Cette situation perdure après le décès de Guye en 1942, et ce jusqu'en 1957, date à laquelle elles sont soumises à une nouvelle analyse qui montre que leur précision est en réalité insuffisante : les résultats obtenus ne peuvent plus être considérés comme vérification de la formule de Lorentz-Einstein. Cette remise en cause des conclusions de Guye et Lavanchy se fonde sur une méthode d'analyse des données brutes publiées en 1921. Il s'agit de réaliser un ajustement de ces données brutes avec un polynôme du second degré dont les coefficients, une fois calculés, sont comparés avec ceux issus des formules d'Abraham et de Lorentz-Einstein appliquées sur l'intervalle de vitesse utilisé par Guye et Lavanchy. Selon cette étude, les mesures ne permettent pas de départager les deux formules.

Si l'analyse *scientifique* de 1957 ne constitue pas une analyse *historique*, elle invite fortement à se demander comment les physiciens des années 1920 ont été amenés à juger favorablement l'expérience de Guye et Lavanchy. Sans procéder à une étude statistique dont l'usage restait alors limité à des domaines spécifiques, comme par exemple l'astronomie, la géodésie, la biométrie ou la démographie, les contemporains de Guye pouvaient voir que les mesures n'étaient pas exemptes d'incertitudes dont certaines auraient même pu être envisagées comme fortement préjudiciables à la validité des conclusions de l'expérience. Or, ce point n'est jamais évoqué. L'expérience est soit évaluée par rapport à celles réalisées antérieurement, soit jugée comme très "soignée", très "belle".

Nous venons de synthétiser les recherches exposées dans les chapitres 1, 2 et 3, qui nous ont amené à proposer une hypothèse de réponse à la question de la réception des conclusions de Guye et Lavanchy. Nous pensons que ceux-ci sont parvenus à réaliser une expérience qui répond à toutes les critiques formulées à l'encontre de Kaufmann, Bucherer et Hupka. Autrement dit, cette expérience ne contient aucune des erreurs qui avaient miné les conclusions de leurs prédécesseurs. Le vide dans le tube cathodique est suffisant, ils utilisent un modèle de pompe parmi les plus récents. Le temps d'enregistrement des mesures de déviation est très bref, généralement moins de 5 secondes. Les clichés qu'ils produisent sont d'une très grande netteté et leur dimension est très satisfaisante avec des déviations mesurées de plusieurs centimètres. La méthode des trajectoires identiques permet de s'affranchir de la dimension du dispositif dans le traitement des mesures, mais également de n'avoir à mesurer que des grandeurs facilement accessibles. Enfin, ils réalisent près de 2000 mesures, obtenues sur 150 clichés.

Pour mener à bien l'étude historique de l'expérience de Guye et Lavanchy, nous avions dès le départ pris le parti d'en réaliser une *réplication*. L'idée sous-jacente était que les descriptions originales d'expériences historiques sont toujours partielles et relèvent toujours du choix de l'expérimentateur de mettre en avant tel aspect, tel détail, telle réussite. De plus, les expériences contiennent toujours des savoir-faire implicites, connus des acteurs et de leurs contemporains mais passés sous silence dans les articles originaux. La *méthode de réplication* a montré tout l'intérêt pour l'historien de reconstruire ces expériences du passé, afin de mettre à jour ces éléments implicites, et finalement acquérir une meilleure compréhension des expériences, de leur déroulement et de leur réception. À cet égard, notre réplication de l'expérience de Guye et Lavanchy s'est avérée très instructive.

De la reconstruction du tube cathodique, à partir de l'observation d'un exemplaire original et de la description qu'en font Guye et Lavanchy, à la reconstruction de ce que nous avons appelé l'*activité de mesure*, nous avons acquis une connaissance et une compréhension claires et précises du dispositif et de son utilisation. Les descriptions originales sont également apparues comme un argumentaire de toutes les précautions que Guye et Lavanchy ont prises pour réaliser un dispositif irréprochable. Mais la réplication nous a en fait apporté plus que cela, principalement suite aux difficultés rencontrées pour produire le rayonnement cathodique, pour *réaliser l'émission cathodique*.

L'expression "rayon cathodique" fait généralement référence à des électrons émis

par une cathode métallique puis accélérés par un champ électrique produit par une différence de potentiel entre cette électrode négative et l'électrode positive, l'anode. Mais il n'est que très rarement fait mention des conditions de l'émission de ces électrons. Or c'est précisément sur ce point que nous avons rencontré les plus grandes difficultés. Les phénomènes de décharge électrique dans les tubes contenant des gaz à diverses pressions sont connus des historiens comme des scientifiques. Nous avons pour notre part abordé le sujet dans une relative ignorance, que nous avons dû combler suite à notre incapacité à produire le rayonnement cathodique. Mais, quand bien même aurions-nous été plus instruit, cela ne nous aurait pas permis de réaliser beaucoup plus aisément l'émission cathodique. En effet, la réplication a montré que celle-ci est obtenue en réglant simultanément la pression dans le tube et la différence de potentiel entre les électrodes. Concrètement, cela signifie qu'il s'agit de régler le fonctionnement d'une pompe à vide et d'une source de tension.

Mais cela ne suffit toujours pas à reconstruire l'expérience de Guye et Lavanchy dans laquelle l'émission cathodique doit être maintenue la plus stable possible pendant une à deux minutes. Pour notre part, avec une pompe et un générateur modernes, ce n'est qu'après une longue pratique que nous avons pu atteindre une telle stabilité. Nous avons mis en évidence l'importance de maîtriser les techniques du vide afin d'obtenir un tube étanche et le plus propre possible. Nous avons également montré le rôle crucial joué par le dispositif de visualisation. En revanche, nous ne sommes pas parvenu à remplacer de façon concluante le générateur moderne par une machine électrostatique, dont la maîtrise est également essentielle à la réussite de l'expérience.

Bien qu'incomplète, notre réplication nous a finalement permis de comprendre ce que Guye et Lavanchy sous-entendent lorsqu'ils parlent de "bon fonctionnement"[133] du tube : le spot, c'est-à-dire l'impact des électrons sur le fond du tube, est *visible* (les enregistrements sont possibles), *défini* (les mesures de la position des spots seront précises), et *immobile* (la vitesse des rayons est constante). Dès lors, leur argumentation apparaît beaucoup plus clairement. Elle vise en fait et en grande partie à montrer que le "bon fonctionnement" du tube est effectivement atteint. Pour une vitesse donnée, ils réalisent entre 10 et 20 déviations électriques et magnétiques, ce qu'ils appellent "détermination", qu'ils enregistrent sur une plaque photographique. Autrement dit, un cliché contient entre 10 et 20 déterminations effectuées sur un faisceau *théoriquement* stable. L'identité de chacune des déterminations sur un même

133. Guye et Lavanchy (1916, p. 353).

cliché illustre alors la stabilité de l'émission cathodique.

Nous avançons que cet argument a joué un rôle déterminant dans la réception favorable des conclusions de Guye et Lavanchy. En effet, nos difficultés nous ont naturellement amené à chercher comment l'émission cathodique était traitée par les contemporains de Guye. Notre étude a montré qu'il s'agit, dans les années 1900-1920, d'une réelle problématique expérimentale, à l'origine d'une classification des rayonnements en vigueur chez les expérimentateurs jusque dans les années 1930, bien après l'acceptation de l'universalité de la particule électron. Cette problématique est également le fondement de discussions entre les expérimentateurs qui cherchent à mesurer la charge spécifique de l'électron ou la variation de son inertie à travers des expériences de dynamique électronique. Des modes de production des rayonnements au début du XX^{e} siècle, la maîtrise toujours plus grande de ces phénomènes conduit à la mise au point de techniques d'émission. Chacune a ses avantages et inconvénients, en termes de pression dans les tubes, de vitesse d'émission et de définition du faisceau.

De ce point de vue, Guye et Lavanchy ont su démontrer leur parfaite maîtrise de l'émission cathodique. Associée à la méthode des trajectoires identiques, cette maîtrise permet de ne pas prêter le flanc aux critiques émises à l'encontre de Kaufmann, Bucherer et Hupka. L'expérience de Guye et Lavanchy est alors effectivement "la plus précise de toutes"[134]. Ils ont su de plus exploiter au maximum les moyens techniques disponibles à l'époque. Leur réussite ne peut être "surpassée"[135].

À un moment où l'enjeu n'est plus de vérifier la théorie de la relativité restreinte, ces expériences abouties peuvent ainsi trouver toute leur place dans le corpus des ouvrages de diffusion ou d'enseignement, et valoir à leur concepteur toute la reconnaissance de ses pairs.

Avant de finir, nous souhaitons pointer certains aspects de ce travail qu'il serait intéressant de compléter, approfondir ou développer.

Il conviendrait certainement de poursuivre l'étude entamée sur l'évolution de la pensée de Guye au sujet de la théorie de la relativité restreinte, pour l'étendre à toute son activité scientifique. Comment comprend-il et interprète-t-il les théories de la relativité restreinte et générale ? Quelle est son attitude face au développement des théories microscopiques que son travail de laboratoire explore sans cesse ? Comment naît et évolue l'intérêt qu'il porte à l'étude du lien entre les lois physico-chimiques,

134. Lettre d'Einstein à Guye exprimant l'avis de ses collègues de Berlin en 1922.
135. Lettre de Starke à Guye.

la physique statistique et la biologie à partir de la seconde moitié des années 1910 ? Ce n'est après tout peut-être pas qu'un hasard si Weiglé, l'un de ses étudiants dans les années 1920 et successeur à la chaire de physique expérimentale en 1930, appliquera ses compétences de physicien au développement de la biologie moléculaire à Genève [136]. Autrement dit, il serait pertinent de poursuivre l'étude de l'œuvre scientifique de Guye envisagé comme, selon ses dires, "témoin des discussions, hésitations, controverses" qui ont marqué la première moitié du XX^{e} siècle.

Un second aspect serait également à approfondir. Les expériences sur la variation de l'inertie des électrons ne se limitent pas à celles de Kaufmann et Bucherer, pour lesquelles il existe des études historiques que nous avons reprises et complétées, ou encore à celles de Hupka et Neumann dont notre étude ne constitue pour l'heure qu'une ébauche. Les expériences de Proctor en 1910 et de Jones en 1916 mériteraient également d'être analysées. L'idée serait de préciser encore notre thèse selon laquelle la réception des expériences de Guye et Lavanchy se fonde sur une évaluation de ses qualités *relativement* aux autres expériences. Pour cela, il s'agirait d'étendre notre connaissance de l'émission cathodique dans le dispositif de Guye aux autres techniques d'émission, mais également au rayonnement β. En particulier, il nous semblerait intéressant de mettre à profit notre expérience dans le domaine de la réplication pour reconstruire un tube dans lequel l'émission est produite par effet photoélectrique ou thermionique. Les débats mis en évidence dans notre travail au sujet des techniques de l'émission cathodique seraient alors certainement mieux appréhendés, mieux compris, plus instructifs.

Enfin, nous n'avons pas abordé directement l'aspect philosophique de notre travail, en particulier la question du statut de l'expérience en physique qui s'est posée ici à travers le problème de la réception des conclusions expérimentales. Nous avons montré que la critique formulée en 1957 à l'égard de la conclusion de Guye et Lavanchy, bien qu'elle fasse partie de son histoire, ne peut constituer un angle d'approche historiquement acceptable pour en étudier et en évaluer la réception dans les années 1920. Toutefois, ce "rebondissement" ne manque pas de nous interpeller. Il illustre l'existence et l'importance des critères d'évaluation d'une expérience. Ceux-ci ne sont *pas invariants*, ils sont situés dans le temps. Concernant la précision, la méthode d'analyse utilisée en 1957 n'était pas appliquée à ce domaine de la physique dans les années 1920. À cette époque, une analyse rudimentaire pouvait suffire. D'autres sont, en plus, *implicites*. Ainsi, pour juger du "bon fonctionnement

136. Strasser (2002).

du tube" mis en avant par Guye et Lavanchy, il fallait être au fait des possibilités et des limitations techniques et expérimentales propres à ce type d'expériences. Enfin, nous constatons que, dans le cas de l'expérience de Guye et Lavanchy, les critères de validation sont *construits* au cours des débats auxquels donnent lieu les expériences de Kaufmann [137], Bucherer et Hupka. Quels rôles jouent ces critères dans la conception, la réalisation, la présentation et la réception d'une expérience ? Constituent-ils seulement une bonne façon d'en appréhender l'histoire ? Quelle que soit la réponse finalement apportée à ces deux questions, identifier et étudier les critères d'évaluation des expériences nous apparaît déjà être un objectif intéressant. Cela permettrait par exemple de mieux comprendre le statut de la mesure dans les sciences expérimentales et son articulation avec les notions d'incertitude, d'erreur et de précision [138].

137. L'exemple de la critique de Planck est saisissant, puisqu'elle ne prend réellement forme que suite aux doutes émis par Bestelmeyer sur le fonctionnement du dispositif de déviation électrique dans le dispositif de Kaufmann.

138. Giora Hon a abordé ces questions dans de nombreuses études dont nous pensons qu'elles pourraient constituer un point de départ intéressant à cette réflexion. (Hon (1995), que nous avons étudié, ainsi que Hon (1987), Hon (1989), Hon (1998), et Hon (2003) que nous n'avons jusqu'ici qu'abordés.

Bibliographie

Abiko, S. (2003), 'On Einstein's distrust of the electromagnetic theory : the origin of the light velocity postulate', *Historical Studies in the Physical Sciences*, 33(2), 193–215.

Abraham, H. et Langevin, P. (1905), *Les Quantités Elémentaires d'Electricité : Ions, Electrons, Corpuscules*, Gauthier-Villars, Paris.

Abraham, M. (1902), 'Dynamik des Elektrons', *Gottingen Nachrichten der deutschen Gesellschaft*, 20–41.

Abraham, M. (1903), 'Prinzipien der Dynamik des Elektrons', *Annalen der Physik*, 10, 105–179.

Abraham, M. (1904a), 'Die Grunghypothesen der Elektronentheorie', *Physikalische Zeitschrift*, 18, 576–579.

Abraham, M. (1904b), 'Zur Theorie der Strahlung und des Strahlungsdruckes', *Annalen der Physik*, 14, 236–287.

Abraham, M. (1923), *Theorie der Elektrizität*, vol. 1 & 2, Teubner, Leipzig - Berlin.

Alberti, E. (1912), 'Neubestimmung der spezifischen Ladung lichtelektrisch ausgelöster Elektronen', *Annalen der Physik*, 39, 1133–1164.

Anderson, D.L. (1964), *The discovery of the electron. The development of the atomic concept of electricity*, D. Van Nostrand Company, Princeton.

Arabatzis, T. (1992), ''The discovery of the Zeeman effect : a case study of the interplay between theory and experiment", *Studies in History and Philosophy of Science A*, 23(3), 365–388.

Arabatzis, T. (1996), 'Rethinking the discovery of the electron', *Studies in the History and Philosphy of Modern Physics*, 27(4), 405–435.

Arabatzis, T. (2006), *Representing electrons : a biographical approach to theoretical entites*, University of Chicago Press, Chicago.

Balibar, F. (2002), *Albert Einstein. Physique, philosophie, politique*, Seuil, Paris.

Becker, A. (1905), 'Messungen an Kathodenstrahlen', *Annalen der Physik*, 17, 381–470.

Bestelmeyer, A. (1907), 'Spezifische Ladung und Geschwindigkeit der durch Röntgenstrahlen erzeugten Kathodenstrahlen', *Annalen der Physik*, 22, 429–447.

Bestelmeyer, A. (1909), 'Bemerkungen zu der Abhandlung Hrn. A. H. Bucherers : „Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips"', *Annalen der Physik*, 30, 166–714.

Bestelmeyer, A. (1910), 'Erwiderung auf die Antwort des Hrn. A. H. Bucherers', *Annalen der Physik*, 32, 231–235.

Bestelmeyer, A. (1911), 'Die Bahn der von einer Wehneltkathode ausgehenden Kathodenstrahlen im homogenen Magnetfeld', *Annalen der Physik*, 35, 909–930.

Blondel, C., Dörries, M., et Pestre, D. (1994), 'Introduction', *in* C. Blondel et M. Dörries (Editeurs), *Restaging Coulomb : Usages, controverses et réplications autour de la balance de torsion*, Leo S. Olschki, Firenze, 5–10.

Borgeaud, C. et Martin, P.E. (1934a), *Histoire de l'Université de Genève. Annexes - l'Académie et l'Université au XIX^{e} siècle*, Georg, Genève.

Borgeaud, C. et Martin, P.E. (1934b), *Histoire de l'Université de Genève. Tome 3 : L'Académie et l'Université au XIX^{e} siècle*, Georg, Genève.

Brachner, A. (1991), 'Wolfgang Gaede', *in* F.L. Holmes (Editeur), *Dictionnary of scientific biography*, vol. 17 Supplément 2, University of Chicago Press, Chicago.

Brachner, A. (2002), *Geschichte der Vakuumpumpen. Zum 400. Geburtstag Otto von Guerickes*, Deutsches Museum, Münich.

Brillouin, L. (2000), 'Les théories d'Einstein et leur vérification expérimentale (La science et la vie, 1922)', *in Science et Vie — Témoin du siècle où tout a changé*, vol. 1, Tana éditions.

Briner, E. (1943), 'Ch.-E. Guye (1867 [sic] -1942)', *Journal de Chimie Physique*, 40, 1–4.

DE BROGLIE, L. (1942), 'Notice sur la vie et les travaux de Charles-Eugène Guye', *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 215, 209–211.

BRUSH, S.G. (1999), 'Why was relativity accepted ?', *Physics in perspective*, 1, 184–214.

BUCHERER, A.H. (1908), 'Messungen an Becquerelstrahlen. Die experimentelle Bestätigung der Lorentz-Einsteinschen Theorie', *Verhanlungen des Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 18-20, 688–699.

BUCHERER, A.H. (1909a), 'Antwort auf die Kritik des Hrn. E. Bestelmeyer bezüglich meiner experimentellen Bestätigung des Relativitätsprinzips', *Annalen der Physik*, 30, 974–986.

BUCHERER, A.H. (1909b), 'Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips', *Annalen der Physik*, 28, 513–536.

BUCHERER, A.H. (1909c), 'Nachtrag zu meiner Arbeit : „Bestätigung des Relativitätsprinzips"', *Annalen der Physik*, 29, 1063.

BUCHWALD, J.Z. (1985), *From Maxwell to Microphysics*, The University of Chicago Press, Chicago.

BUCHWALD, J.Z. (1994), 'The cathode rays as a vehicle for success', *in* J.Z. BUCHWALD (Editeur), *The creation of scientific effects : Heinrich Hertz and electric waves*, The University of Chicago Press, Chicago and London, 131–174.

BUCHWALD, J.Z. (1995), 'Why Hertz was right about cathode rays ?', *in* J.Z. BUCHWALD (Editeur), *Scientific Practice : theories and stories of doing physics*, The University of Chicago Press, Chicago and London, 254–321.

BUCHWALD, J.Z. (2001), 'Reply to Mattingly', *Studies in the History and Philosphy of Modern Physics*, 32(1), 77–79.

BUCHWALD, J.Z. et WARWICK, A. (Editeurs) (2001), *Histories of the electron. The birth of microphysics*, The MIT Press, Cambridge.

CARPENTIER, J.A. (1907), *Ateliers Ruhmkorff - J. Carpentier : Catalogue 1907, appareils courants*, Imprimerie E. Desfossés, Paris.

CAVICCHI, E. (2002), 'Experiences with the magnetism of conducting loops : historical instruments, experimental replications, and productive confusions', *American journal of physics*, 71(2), 156–167.

CAVICCHI, E. (2005), 'Sparks, shocks and voltage traces as windows into experiences', *Archives des sciences*, 58(2), 123–136.

CAVICCHI, E. (2008), 'A witness account of solar microscope projections : collective acts integrating across personal and historical memory', *British journal for the history of science*, 41(3), 369–383.

CLASSEN, J. (1908), 'Eine Neubestimmung von $\frac{\epsilon}{\mu}$ für Kathodenstrahlen', *Physikalische Zeitschrift*, 9, 762–765.

COOLIDGE, W.D. (1913), 'A powerfull Röntgen ray tube with a pure electron discharge', *Physical Review*, 2(6), 409–430.

CURIE, P. (1900), 'Substances radioactives', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 10, 388–389.

CUSHING, J.T. (1981), 'Electromagnetic mass, relativity, and the Kaufmann experiments', *American Journal of Physics*, 49, 1133–1149.

DARRIGOL, O. (1994), 'The electron theories of Larmor and Lorentz : a comparative study', *Historical studies in the physical and biological sciences*, 24(2), 265–336.

DARRIGOL, O. (1996), 'The electrodynamic origins of relativity theory', *Historical studies in the physical and biological sciences*, 26(2), 241–312.

DARRIGOL, O. (2000), *Electrodynamics from Ampère to Einstein*, Oxford University Press, New York.

VAN DONGEN, J. (2007), 'Reactionaries and Einstein's fame : "German scientists for the preservation of pure science," relativity, and the Bad Nauheim meeting', *Physics in perspective*, 9, 212–230.

DUNOYER, L. (1924), *La technique du vide. Recueil des conférences-rapports de documentation sur la physique Volume 7*, Journal de Physique : Presses universitaires de France, Paris.

EINSTEIN, A. (1905), 'Zur Elektrodynamik bewegter Körper', *Annalen der Physik*, 17, 891–921.

EINSTEIN, A. (1961), *Relativity – The special and the general theory*, Three rivers press, New York.

EINSTEIN, A. (1993), 'Volume 5 : the Swiss years : correspondence, 1902 - 1914', *in* M.J. KLEIN, A.J. KOX, R. SCHULMANN, P. BRENNI, K. HENTSCHEL, J. RENN, et L. RUETSCHE (Editeurs), *The collected papers of Albert Einstein*, Princeton University Press, Princeton.

EINSTEIN, A. (1997), 'Volume 8 : the Berlin years : correspondence, 1914 - 1918', *in* R. SCHULMANN, A.J. KOX, M. JANSSEN, et J. ILLY (Editeurs), *The collected papers of Albert Einstein*, Princeton University Press, Princeton.

EINSTEIN, A. (2004), 'Volume 9 : the Berlin years : correspondence, January 1919 - April 1920', *in* D.K. BUCHWALD, R. SCHULMANN, J. ILLY, D.J. KENNEFICK, et T. SAUER (Editeurs), *The collected papers of Albert Einstein*, Princeton University Press, Princeton.

FALCONER, I. (1987), 'Cathode rays, Electrons and Corpuscules : J.J. Thomson and the 'Discovery of the Electron", *British Journal of History of Science*, 20, 241–276.

FALCONER, I. (2001), 'Corpuscules to electrons', *in* J.Z. BUCHWALD et A. WARWICK (Editeurs), *Histories of the electron. The birth of microphysics*, The MIT Press, Cambridge, 77–100.

FARAGÓ, P.S. et JÁNOSSY, L. (1957), 'Review of the experimental evidence for the law of variation of the electron mass with velocity', *Il Nuovo Cimento*, V.6, 1411–1436.

FRÉMY, E. (1924), *Le guide du chimiste*, Journal de Physique : Presses universitaires de France, Paris.

FRERCKS, J. (2000), 'Creativity and technology in experimentation : Fizeau's terrestrial determination of the speed of light', *Centaurus*, 42, 249–287.

FRIEDMAN, R.M. (2005), 'Einstein and the Nobel Committee : authority vs. expertise', *Europhysics News*, 36(4), 129–133.

GERLACH, W. (1926), 'Elektronen', *in Handbuch der Physik*, vol. 22, Verlag von Julius Springer, Berlin.

GERWARD, L. (1999), 'Paul Villard and his discovery of gamma rays', *Physics in perspective*, 1, 367–383.

GIROUD, F. (1981), *Une femme honorable. Marie Curie, une vie*, Fayard, Paris.

GOLDBERG, S. (1970), 'The Abraham theory of the electron : the symbiosis of experiment and theory', *Archive for history of exact sciences*, 7, 6–25.

GOLDBERG, S. (1976), 'Max Planck's philosophy of nature and his elaboration of the special theory of relativity', *Historical Studies in the Physical Sciences*, 7, 125–160.

GOLDSTEIN, E. (1876), 'Vorläufige Mittheilungen über elektrische Entladungen in verdünnten Gasen', *Monatsbericht der Königlich Preussichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 279–295.

GOLDSTEIN, E. (1879), 'Ueber Kathodenstrahlen', *Wiedemann Annalen*, 53, 234–245.

GOLDSTEIN, E. (1881), 'Über elektrische Lichterscheinungen in Gasen', *Annalen der Physik*, 12, 90–109.

GOODAY, G. (2001), 'The questionable matter of electricity : the reception of J.J. Thomson' "corpuscule" among electrical theorists and technologists', *in* J.Z. BUCHWALD et A. WARWICK (Editeurs), *Histories of the electron. The birth of microphysics*, The MIT Press, Cambridge, 101–134.

GUYE, C.E. (1889a), 'Sur la polarisation rotatoire du chlorate de soude - Mémoire complet', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 22, 130–169.

GUYE, C.E. (1889b), 'Sur le pouvoir rotatoire du chlorate de soude cristallisé', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 21, 266–268.

GUYE, C.E. (1889c), 'Sur le pouvoir rotatoire du chlorate de soude cristallisé', *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 108, 348–350.

GUYE, C.E. (1890), 'Conditions de sensibilité des bolomètres', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 24, 425 & 660–670.

GUYE, C.E. (1892), 'Problème du pont de Wheatstone appliqué au bolomètre', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 27, 26–47.

GUYE, C.E. (1894), 'Sur la moyenne distance géométrique de tous les éléments d'un ensemble de surfaces et son application au calcul des coefficients d'induction', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 32, 480–492 & 574–587.

GUYE, C.E. (1904), 'Les hypothèses modernes sur la constitution électrique de la matière — Rayons cathodiques et corps radioactifs', *in* C.E. GUYE (Editeur), *Travaux du Laboratoire de Physique — Première Série*, Imprimerie Albert Kundig, Genève, 5^e & 8^e fascicules.

GUYE, C.E. (1906a), 'Sur la valeur du rapport $\frac{\epsilon}{\mu_0}$ de la charge à la masse de l'électron', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 21, 346–348.

GUYE, C.E. (1906b), 'Sur la valeur la plus probable du rapport $\frac{\epsilon}{\mu_0}$ de la charge à la masse de l'électron dans les rayons cathodiques', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 21, 461–468.

GUYE, C.E. (1906c), 'Sur la valeur numérique la plus probable du rapport $\frac{\epsilon}{\mu_0}$ de la charge à la masse de l'électron dans les rayons cathodiques', *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 142, 833–836.

GUYE, C.E. (1911), 'Un puissant auxiliaire de la science et de l'industrie ; l'arc voltaïque ; son mécanisme et ses applications', *in* C.E. GUYE (Editeur), *Travaux du Laboratoire de Physique — Deuxième Série*, Imprimerie Albert Kundig, Genève, Appendice.

GUYE, C.E. (1912), 'Le frottement intérieur des solides, ses variations avec la température', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 34, 535–561.

GUYE, C.E. (1917a), 'Exposé de quelques conséquences du principe de relativité (conférence)', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 44, 487–489.

GUYE, C.E. (1917b), 'Théorie de la rotation de la décharge électrique sous l'influence d'un champ magnétique', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 44, 489–491.

GUYE, C.E. (1918), 'Tables pour le calcul des masses longitudinales, transversales et cinétiques dans la relativité', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 46, Suppl. 81–82.

GUYE, C.E. (1920), 'Sur le rôle de l'inégale répartition des ions dans le phénomène de la décharge disruptive', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 2, 419–421.

Guye, C.E. (1921), 'Vérification de la formule de Lorentz-Einstein', *Mémoires de la Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève*, 39 :6, 273–363.

Guye, C.E. et Berchten, E. (1912), 'Sur le frottement intérieur du cuivre aux températures élevées', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 33, 355–356.

Guye, C.E. et Bernoud, A. (1901), 'Mesure électrothermique de la puissance des courants rapidement variables', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 12, 314–316.

Guye, C.E. et Bron, A. (1908), 'Différence de potentiel et stabilité de l'arc alternatif entre métaux', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 25, 453–473 & 549–576.

Guye, C.E. et Guye, H. (1905), 'Recherches sur la décharge disruptive dans les gaz aux pressions élevées', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 20, 5–27 & 111–127.

Guye, C.E. et Lavanchy, C. (1915a), 'Inertie des électrons cathodiques de grande vitesse (communication ayant figuré à l'ordre du jour de la séance qui devait avoir lieu à Berne le 2 septembre 1914)', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 39, 88.

Guye, C.E. et Lavanchy, C. (1915b), 'Vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein par les rayons cathodiques de grande vitesse', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 40, 166–167.

Guye, C.E. et Lavanchy, C. (1915c), 'Vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein par les rayons cathodiques de grande vitesse', *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 161, 52–55.

Guye, C.E. et Lavanchy, C. (1915d), 'Vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein par les rayons cathodiques de grande vitesse', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 40, 334–336.

Guye, C.E. et Lavanchy, C. (1916), 'Vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein par les rayons cathodiques de grande vitesse', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 42, 286–299 & 353–373 & 441–448.

Guye, C.E. et Mercier, P. (1920), 'Recherches sur le potentiel disruptif dans l'anhydride carbonique aux pressions élevées', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 2, 30–49 & 99–124.

Guye, C.E. et Mintz, S. (1908), 'Étude sur la viscosité de quelques métaux en fonction de la température', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 26, 136–166 & 263–278.

Guye, C.E. et Monasch, B. (1902), 'Recherches sur l'arc alternatif de faible intensité entre électrodes métalliques', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 14, 382–384.

Guye, C.E. et Monasch, B. (1903), 'L'arc de faible intensité entre électrodes métalliques', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 15, 349–351.

Guye, C.E. et Ratnowsky, S. (1909), 'L'inertie électromagnétique des rayons cathodiques de grande vitesse', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 28, 290.

Guye, C.E. et Ratnowsky, S. (1910a), 'Sur la variation de l'inertie de l'électron en fonction de la vitesse dans les rayons cathodiques et sur le principe de relativité', *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 150, 326–329.

Guye, C.E. et Ratnowsky, S. (1910b), 'Sur la variation de l'inertie des corpuscules cathodiques en fonction de la vitesse et sur le principe de relativité', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 29, 339–340.

Guye, C.E. et Ratnowsky, S. (1911), 'Détermination expérimentale de la variation d'inertie des corpuscules cathodiques en fonction de la vitesse', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 31, 293–321.

Guye, C.E. et Rothen, A. (1921), 'Recherches sur la rotation de la décharge électrique sous l'influence d'un champ magnétique', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 3, 441–470.

Guye, C.E. et Rudy, R. (1921), 'Nouveau mode de détermination des diamètres moléculaires par la rotation électromagnétique de la décharge dans les gaz', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 4, Suppl. 4–6.

GUYE, C.E. et RUDY, R. (1923), 'Sur la rotation de la décharge électrique dans un champ magnétique', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 5, 182–196 & 241–258.

GUYE, C.E. et SCHIDLOF, A. (1904), 'L'hystérésis magnétique aux fréquences élevées dans le fer, le nickel et les aciers au nickel', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 18, 576–593.

GUYE, C.E. et TSCHERNIAWSKY, A. (1910), 'Sur la mesure des très hauts potentiels par l'emploi d'électromètres sous pression', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 29, 340–341.

GUYE, C.E. et VOÏKOFF, P. (1914), 'Nouvelles déterminations du frottement intérieur aux basses températures, suivies d'une remarque de M. Guye sur la nature du frottement intérieur', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 39, 85–87.

HEERING, P. (1992), 'On Coulomb's inverse square law', *American journal of physics*, 60(11), 988–994.

HEERING, P. (1994), 'The replication of the torsion balance experiment. The inverse square law and its refutation by early 19th-century German physicists', *in* C. BLONDEL et M. DÖRRIES (Editeurs), *Restaging Coulomb : Usages, controverses et réplications autour de la balance de torsion*, Leo S. Olschki, Firenze, 47–66.

HEERING, P. (2005), 'Weighing heat : The replication of the experiments with the ice-calorimeter of Lavoisier and Laplace', *in* M. BERETTA (Editeur), *Lavoisier in Perspective*, Deutsches Museum, München, 27–41.

HEERING, P. (2006), 'Regular twists : replicating Coulomb's wire-torsion experiments', *Physics in Perspective*, 8, 52–63.

HEIL, W. (1910a), 'Diskussion der Versuche über die träge Masse bewegter Elektronen', *Annalen der Physik*, 31, 519–546.

HEIL, W. (1910b), 'Zur Diskussion der Hupkaschen Versuche über die träge Masse bewegter Elektronen', *Annalen der Physik*, 33, 403–413.

HENTSCHEL, K. (1992), 'Einstein's attitude towards experiment : testing relativity theory 1907-1927', *Studies in History and Philosophy of Science A*, 23(4), 593–625.

HODGSON, M.B. (1918), 'The physical characteristics of x-ray fluorescent intensifying screens', *Physical Review*, 12(6), 431–435.

HON, G. (1987), 'H. Hertz :'The electrostatic and magnetic properties of the cathode rays are either *nil* or very feeble.' (1883) A case-study of an experimental error', *Studies in History and Philosophy of Science*, 18(3), 367–382.

HON, G. (1989), 'Towards a typology of experimental errors : an epistemological view', *Studies in History and Philosophy of Science*, 20(4), 469–504.

HON, G. (1995), 'Is the identification of experimental error contextually dependent ? The case of Kaufmann's experiment and its varied reception', *in* J.Z. BUCHWALD (Editeur), *Scientific practice : Theories and stories of doing physics*, The university of Chicago Press, Chicago, 170–223.

HON, G. (1998), '"If this be error" : Probing experiment wih error', *in* M. HEIDELBERGER et F. STEINLE (Editeurs), *Experimental essays — Versuche zum Experiment*, Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden, 227–248.

HON, G. (2003), 'The idols of experiment. Transcending the "etc. list"', *in* H. RADDER (Editeur), *The philosophy of scientific experimentation*, University of Pittsburgh Press, Pittsburgh, 174–197.

HONG, S. (1995), 'Forging scientific electrical engineering : John Ambrose Flemming and the Ferranti effect', *Isis*, 86, 30–51.

HUPKA, E. (1909), 'Die träge Masse bewegter Elektronen (Vorläufige Mitteilungen)', *Verhanlungen des Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 10/11, 249–258.

HUPKA, E. (1910a), 'Beitrag zur Kenntnis der trägen Masse bewegter Elektronen', *Annalen der Physik*, 31, 169–204.

HUPKA, E. (1910b), 'Zur Frage der trägen Masse bewegter Elektronen', *Annalen der Physik*, 33, 400–402.

JACKSON, J.D. (2001), *Électrodynamique classique*, Dunod, Paris.

JAMMER, M. (1997), *Concepts of mass in classical and modern physics*, Dover publications, New York.

JANSSEN, M. (1995), *A comparison between Lorentz's ether theory and special relativity in the light of the experiments of Trouton and Noble*, Thèse de doctorat, University of Pittsburgh, Pittsburgh.

JANSSEN, M. (2002), 'Reconsidering a scientific revolution : the case of Einstein *versus* Lorentz', *Physics in perspective*, 4, 421–446.

JANSSEN, M. (2009), 'Drawing the lines between kinematics and dynamics in special relativity', *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 40, 26–52.

JANSSEN, M. et MECKLENBURG, M. (2007), 'From classical to relativistic mechanics : electromagnetic models of the electron', , 65–134.

MEI JIANG, Y. (1992), *Pulvérisation cathodique assistée par ordinateur*, Thèse de doctorat, Université Paris XI, Orsay.

JONES, L.T. (1916), 'An experimental verfication of the law of variation of mass with velocity for cathode rays', *Physical Review*, 8, 52–65.

JULLIARD, C. (1909), *Documents pour servir à l'histoire de l'Université de Genève. Volume V.*, Genève.

KAUFMANN, W. (1901a), 'The development of the electron idea', *The Electrician*, 95–97.

KAUFMANN, W. (1901b), 'Die magnetische und elektrische Ablenkbarkeit der Bequerelstrahlen und die scheinbare Masse der Elektronen', *Gottingen Nachrichten der deutschen Gesellschaft*, 1, 143–168.

KAUFMANN, W. (1902a), 'Die elektromagnetische Masse des Elektrons', *Physikalische Zeitschrift*, 4, 54–57.

KAUFMANN, W. (1902b), 'La déviation électrique et magnétique des rayons Becquerel et la masse électromagnétique des électrons', *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 135, 577–579.

KAUFMANN, W. (1902c), 'Über die elektromagnetische Masse des Elektrons', *Gottingen Nachrichten der deutschen Gesellschaft*, 5, 291–296.

KAUFMANN, W. (1903), 'Über die "Elektromagnetische Masse" der Elektronen', *Gottingen Nachrichten der deutschen Gesellschaft*, 3, 90–103.

KAUFMANN, W. (1905), 'Über die Konstitution des Elektrons', *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 949–956.

KAUFMANN, W. (1906), 'Über die Konstitution des Elektrons', *Annalen der Physik*, 19, 487–553.

KNUDSEN, O. (2001), 'O.W. Richardson and the electron theory of matter', *in* J.Z. BUCHWALD et A. WARWICK (Editeurs), *Histories of the electron. The birth of microphysics*, The MIT Press, Cambridge, 227–253.

LACKI, J. et KARIM, Y. (2005), 'Replication of Guye and Lavanchy's experiment on the velocity dependency of inertia', *Archives des Sciences*, 58(2), 159–169.

LAHAYE, H. (1939), 'Messungen der Massenveränderlichkeit sehr schnell bewegter Elektronen', *Annalen der Physik*, 34, 60–76.

LANGEVIN, P. (1905), 'La physique des électrons', *Revue générale des sciences*, 16, 257–276.

LANGEVIN, P. (1950a), 'Le principe de relativité (1922)', *in Œuvres scientifiques de Paul Langevin*, CNRS, Paris, 436–466.

LANGEVIN, P. (1950b), 'L'inertie de l'énergie et ses conséquences (1913)', *in Œuvres scientifiques de Paul Langevin*, CNRS, Paris, 397–426.

VON LAUE, M. (1913), *Das Relativitätsprinzip*, F. Vieweg, Braunschweig.

LAVANCHY, C. (1917), *Vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein sur les rayons cathodiques de grande vitesse*, Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de l'Université de Genève, Genève.

LEFEBVRE, T. (1997), 'La lorgnette humaine. Cinéma et Rayons X à la conquête de l'intimité', *Revue de l'Association française de recherche sur le cinéma*, 23, 21–36.

LELONG, B. (1995), *Vapeurs, foudres et particules : les pratiques expérimentales de l'ionisation des gaz à Paris et à Cambridge*, Thèse de doctorat, Université Paris 7, Paris.

Lelong, B. (2001), 'Paul Villard, J.J. Thomson, and the composition of cathode rays', *in* J.Z. Buchwald et A. Warwick (Editeurs), *Histories of the electron. The birth of microphysics*, The MIT Press, Cambridge, 135–167.

Lenard, P. (1967), 'Nobel lecture on May 28, 1906 : On Cathode Rays', *in Nobel lectures : Physics, 1901-1921*, vol. 1, Elsevier Publishing Co., New York, 105–134.

Lenard, P., Becker, A., et Wien, W. (1927), 'Kathodenstrahlen & Kanalstrahlen', *in Handbuch der Experimentalphysik*, vol. 14, Akademische Verlagsgesellschaft M.B.H., Leipzig.

Lerp, K.T. (1911), *Untersuchung der Fehlerquellen in den älteren Bestimmungnen der spezifischen Ladung des Elektrons*, Thèse de doctorat, hohen philosophischen Fakultät der Georg-August-Universität zu Göttingen, Göttingen.

Liénard, A. (1898), 'La théorie de Lorentz et celle de Larmor', *L'Éclairage électrique*, 16, 320–334 ; 360–365.

Émile Littré, P. (2003), *Dictionnaire de la langue française*, Encyclopaedia Britannica, Versailles.

Lodge, O. (1907), *Electrons*, Bell, Londres.

Lorentz, H.A. (1899), 'Simplified theory of electrical and optical phenomena in moving bodies', *Proceedings of the section of sciences, Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam*, 1, 427–442.

Lorentz, H.A. (1915), *The theory of electrons and its application to the phenomena of light and radiant heat. 2^{nd} eidition*, Teubner, Leipzig.

Lorentz, H.A. (1927), *Problems of modern physics. A course of lectures delivered in the California Insitute of Technology*, Ginn., Boston.

Lorentz, H.A. (1929), *Vorlesungen über theoretische Physik an der Universität Leiden. Band IV. Die Relatvitätstheorie für gleichförmige Translationen (1910-1912)*, Akademische Verlagsgesellschaft M.B.H., Leipzig.

Lorentz, H.A. (1935-1939), 'Sur la théorie de la réflexion et de la réfraction de la lumière', *in* P. Zeeman et A.D. Fokker (Editeurs), *Collected papers, vol. 1*, Nijhoff, The Hague, 193–383.

LORENTZ, H.A. (1952 [1904]), 'Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity less than that of light', *in* H.A. LORENTZ, A. EINSTEIN, H. MINKOWSKY, et H. WEYL (Editeurs), *The principle of relativity*, Dover, New York.

MACLACHLAN, J. (1976), 'Galileo's experiments with pendulums : real and imaginary', *Annals of science*, 33, 173–185.

MACLACHLAN, J. (1998), 'Experimenting in the history of science', *Isis*, 89, 90–92.

MALASSEZ, J. (1905), 'Sur la différence de potentiel sous laquelle sont produits les rayons cathodiques', *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 141, 884–886.

MALASSEZ, J. (1911), 'Recherches sur les rayons cathodiques', *Annales de chimie et de physique*, 23, 231–275 et 397–424.

MATTINGLY, J. (2001a), 'The replication of Hertz's cathode ray experiments', *Studies in the History and Philosphy of Modern Physics*, 32(1), 53–75.

MATTINGLY, J. (2001b), 'Reply to Buchwald', *Studies in the History and Philosphy of Modern Physics*, 32(1), 81–82.

MAURAIN, C. (1926), 'M. C. E. Guye. Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Genève', *L'Information universitaire*.

MCCORMMACH, R. (1970a), 'H.A. Lorentz and the electromagnetic view of nature', *ISIS*, 61, 459–497.

MCCORMMACH, R. (1970b), 'Einstein, Lorentz, and the Electron Theory', *Historical Studies in the Physical Sciences*, 2.

MEHRA, J. (1975), *The Solvay Conferences on Physics, Aspects of the development of physics since 1911*, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht-Boston.

MERCIER, P. et HAMMERSHAIMB, G. (1920), 'De l'influence de la forme des électrodes et de la pression du gaz sur le potentiel disruptif', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 2, 421–423.

MILLER, A.I. (1973), 'A study of Henri Poincaré's "Sur la dynamique de l'électron"', 10, 207–328.

MILLER, A.I. (1981), *Albert Einstein's special theory of relativity : emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)*, Adison Wesley, Reading : Mass.

MULLER, A. (1917), 'Tube à rayons X pour recherches de laboratoire', *in* C.E. GUYE (Editeur), *Travaux du Laboratoire de Physique — Cinquième Série*, Imprimerie Albert Kundig, Genève, 7^{me} fascicule.

MULLER, A. (1918), 'Recherches sur la limite du spectre continu des rayons X et la loi des quanta', *in* C.E. GUYE (Editeur), *Travaux du Laboratoire de Physique — Cinquième Série*, Imprimerie Albert Kundig, Genève, 9^{me} fascicule.

MULLER, A. (1919), 'Recherches sur les spectres des rayons X', *in* C.E. GUYE (Editeur), *Travaux du Laboratoire de Physique — Cinquième Série*, Imprimerie Albert Kundig, Genève, 11^{me} fascicule.

MÜLLER, F. (2004), *Gasentladungsforschung im 19. Jahrhundert*, GNT Verlag, Berlin.

MULLIGAN, J.F. (1997), 'The personal and professional interactions of J.J. Thomson and Arthur Schuster', 65(10).

MULLIGAN, J.F. (1999), 'Heinrich Hertz and Philipp Lenard : two distinguished physicists, two disparate men', *Physics in Perspective*, 1, 345–366.

NACHFOLGER, L. (1913), *Einrichtungen une Apparate für physikaischen Unterricht sowie für Übungen im Praktikum*, Zweigniederlassung, Berlin.

NACKEN, M. (1935), 'Messungen der Massenveränderlichkeit des Elektrons an schellen Kathodenstrahlen', *Annalen der Physik*, 23, 313–329.

NEUMANN, G. (1914), 'Die träge Masse schnell bewegter Elektronen', *Annalen der Physik*, 45, 529Ű579.

PAIS, A. (1982), *"Subtle is the Lord..." the science and the life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford.

PAULI, W. (1958), *Theory of Relativity*, Pergamon Press, London.

PESTRE, D. (1994), 'La pratique de reconstruction des expériences historiques, une toute première réflexion', *in* C. BLONDEL et M. DÖRRIES (Editeurs), *Restaging Coulomb : Usages, controverses et réplications autour de la balance de torsion*, Leo S. Olschki, Firenze, 17–30.

DE PHYSIQUE", C. (), *Cabinet de physique, instruments, répertoires et registre d'entrée.*

Planck, M. (1906a), 'Das Prinzip der Relativität und die Grundgleichungen der Mechanik', *Verhanlungen des Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 8, 136–141.

Planck, M. (1906b), 'Die Kaufmannschen Messungen der Ablenkarbeit der β-Strahlen in ihrer Bedeutung für die Dynamik der Elektronen', *Physikalische Zeitschrift*, 7, 753–761.

Planck, M. (1907), 'Nachtrag zu der Besprechung der Kaufmannschen Ablenkungsmessungen', *Verhandlungen des Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 9, 301–305.

Planck, M. (1908), 'Zur Dynamik bewegter Systeme', *Annalen der Physik*, 26, 1Ű34.

Poincaré, H. (1899), *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes*, G. Carré et C. Naud, Paris.

Poincaré, H. (1900), 'La théorie de Lorentz et le principe de réaction', *in Recueils de travaux offerts par les auteurs à H. A. Lorentz*, Nijhoff, The Hague, 252–278.

Poincaré, H. (1906), 'Sur la dynamique de l'électron', *Rendiconti del circolo matematico di Palermo*, 21, 129–175.

Poincaré, H. (1968), *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris.

Poincaré, H. (1989), 'Sur la dynamique de l'électron', Jacques Gabay, Paris.

Poincare, H. (1952), 'Les idées de Hertz sur la mécanique (1897)', *in Œuvres de Henri Poincaré — Vol. 7*, Gauthier-Villars, Paris, 231–250.

Proctor, C.A. (1909), 'Preliminary note on the variation with speed of the mass of an electron', *Proceedings of the American physical society*, 28, 470–471.

Proctor, C.A. (1910), 'The variation with velocity of e/m for cathode rays', *Physical Review*, 30, 53–61.

Pyenson, L. (2008), 'Physical sense in relativity : Max Planck edits the Annalen der Physik, 1906-1918', *Annalen der Physik*, 17(2-3), 176–189.

de Queiroz, A.C.M. (), *Electrostatic Machines*, URL http://www.coe.ufrj.br/~acmq/electrostatic.html.

RATNOWSKY, S. (1911), *Détermination expérimentale de la variation d'inertie des corpuscules cathodiques en fonction de la vitesse*, Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de l'Université de Genève, Genève.

REIGER, R. (1905), 'Über das Verhältnis ϵ/μ bei Kathodenstrahlen verschieden Ursprunges', *Annalen der Physik*, 17, 947–959.

ROBOTTI, N. (1995), 'J.J. Thomson at the Canvendish laboratory : the history of an electric charge measurement', *Annals of Science*, 52(3), 265–284.

ROGERS, M.M., MCREYNOLDS, A.W., et ROGERS, F.T. (1940), 'A determination of the masses and velocities of three Radium B Beta-articles. The relativistic mass of the electron', *Physical Review*, 57, 379–383.

ROMILLY, T. (1906a), 'Étude sur la différence de potentiel de l'arc Mercure-Platine', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 21, 601–616.

ROMILLY, T. (1906b), 'Étude sur la différence de potentiel de l'arc Mercure-Platine (suite)', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 22, 19–39.

ROUSSEAU, C. (2003), 'William David Coolidge et l'âge d'or de la radiograhie dentaire', *in XIII^e Congrès de la SFHAD — Metz, 25-26 avril 2003*, Société Française d'Histoire de l'Art Dentaire, URL http://www.bium.univ-paris5.fr/sfhad/vol8/article10.htm.

SAINI, H. (1943), 'Charles-Eugnène Guye (1866-1942)', *Compte rendu des séances de la Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève*, 60(1), 18–28.

SCHAEFER, C. (1913), 'Die träge masse schnell bewegter Elektronen', *Verhandlungen des Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 20, 935–938.

SCHIDLOF, A. (1905), 'Emploi du tube de Braun à l'étude des cycles d'aimantation aux fréquences élevées', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 20, 258–267 & 461.

SCHIDLOF, A. (1922), 'Les preuves empiriques élémentaires de la théorie de la relativité restreinte', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 4, 333–342.

SCHIDLOF, A. et ALBERT, A. (1914), 'Indépendance de l'hystérésis alternative (fréquences élevées) de la vitesse des variations du champ magnétisant', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 37, 117–132.

SCHIDLOF, A. et CHAMIÉ, C. (1913), 'Influence de la rapidité des variations du champ magnétisant sur l'hystérsis alternative', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 36, 13–40.

SCHIDLOF, A. et MURZYNOWSKA, J. (1913), 'Détermination de la charge de l'électron', *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 156, 304.

SCHOTTKY, W., ROTHE, H., et SIMON, H. (1928), 'Glühelektronen und Teschnische Elektronenröhren', *in Handbuch der Experimentalphysik*, vol. 13, Akademische Verlagsgesellschaft M.B.H., Leipzig.

SCHUSTER, A. (1884), 'Experiments on the discharge of electricity through gases. Sketch of a theory', *Proceedings of the Royal Society of London*, 37, 317–339.

SCHUSTER, A. (1890), 'The discharge of electricity through gases (preliminary communication)', *Proceedings of the Royal Society of London*, 47, 526–559.

SCHWEIDLER, E. et BECKER, A. (1928), 'Die Ionenleitung in Gasen — Die elektrischen Eigenschaften der Flamme', *in Handbuch der Experimentalphysik*, vol. 13, Akademische Verlagsgesellschaft M.B.H., Leipzig.

SEELIGER, R. et MIERDEL, G. (1929), 'Selbständige Entladungen in Gasen', *in Handbuch der Experimentalphysik*, vol. 13, Akademische Verlagsgesellschaft M.B.H., Leipzig.

SEITZ, W. (1901), 'Beiträge zur Kenntnis der Kathodenstrahlen', *Annalen der Physik*, 6, 1–33.

SEITZ, W. (1902), 'Vergleich einiger Methoden zur Bestimmung der Grösse ϵ/μ bei Kathodenstrahlen', *Annalen der Physik*, 8, 233–243.

SIMON, S. (1899), 'Ueber das Verhältniss der elektrischen Ladung zur Masse der Kathodenstrahlen', *Annalen der Physik*, 69, 589–611.

SMITH, G.E. (2001), 'J.J. Thomson and the electron, 1897-1899', *in* J.Z. BUCHWALD et A. WARWICK (Editeurs), *Histories of the electron. The birth of microphysics*, The MIT Press, Cambridge, 23–76.

SORET, C. et GUYE, C.E. (1892a), 'Sur le pouvoir rotatoire du quartz aux basses températures', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 28, 346–347.

Soret, C. et Guye, C.E. (1892b), 'Sur le pouvoir rotatoire du quartz aux basses températures', *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 115, 1295–1296.

Soret, C. et Guye, C.E. (1892c), 'Sur le pouvoir rotatoire du quartz aux basses températures', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles de Genève*, 29, 108 & 242–255.

Speziali, P. (1997), *Physica Genevensis - La vie et l'œuvre de 33 physiciens genevois, 1546-1953*, Georg, Chêne-Bourg.

Starke, H. (1903a), 'Die magnetische une elektrische Ablenkbarkeit reflektierter und von dünnen Metallblätchen hindurchgelassener Kathodenstrahlen', *Verhanlungen des Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 1, 14–22.

Starke, H. (1903b), 'Über die elektrische une magnetische Ablenkung schneller Kathodenstrahlen', *Verhanlungen des Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 13, 241–250.

Starke, H. et Nacken, M. (1934), 'Über die Bestimmung der Massenveränderlichkeit des Elektrons an schellen Kathodenstrahlen', *Annalen der Physik*, 21, 67–88.

Strasser, B.J. (2002), 'Totems de laboratoires, microscopes électroniques et réseaux scientifiques : L'émergence de la biologie moléculaire à Genève', *Revue d'histoire des sciences*, 55-1, 5–53.

Swenson, L.S. (1972), 'Charles-Eugène Guye', *in* C.C. Gillispie (Editeur), *DIctionary of Scientific Biographies. Volume 5*, Ch. Scribner's sons, New York, 597–598.

Swenson, L.S. (1979), *Genesis of Relativity*, Burt Franklin and Co, New York.

Thompson, S.P. (1897), 'Cathode rays and some analogous rays', *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A.*, 190, 471–490.

Tonnelat, M.A. (1971), *Histoire du principe de relativité*, Flammarion, Paris.

Townsend, J.S. (1915), *Electricity in Gases*, The Clarendon Press, Oxford.

Usselman, M.C., Reinhart, C., et Foulser, K. (2005), 'Restaging Liebig : a study in the replication of experiments', *Annals of science*, 62(1), 1–55.

VILLARD, P. (1900), *Les rayons cathodiques*, Scientia, Paris.

WEIGLE, J. (1943), 'Charles-Eugène Guye (1866-1942)', *Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles*, 115, 314–316.

WEIGLÉ, J. (1943), 'Souvenir de Charles-Eugène Guye', *Archives des Sciences Physiques et Naturelles*, 25, 57–79.

WHEATON, B.R. (1978), 'Philipp Lenard and the Photoelectric Effect, 1889-1911', *Historical Studies in the Physical Sciences*, 9, 299–322.

WHITTAKER, E.T. (1987), *A history of the theories of aether and electricity. The modern theories*, Tomash Publishers, New York : American institute of physics.

WIEN, W. (1901), 'Über die Möglichkeit einer elektromagnetischen Begründung der Mechanik', *Annalen der Physik*, 5, 501–513.

ZAHN, C.T. et SPEES, H.A. (1938a), 'A critical analysis of the classical experiments on the relativistic variation of electron mass', *Physical Review*, 53, 511–521.

ZAHN, C.T. et SPEES, H.A. (1938b), 'An Improved Method for the Determination of the Specific Charge of Beta-Particles', *Physical Review*, 53, 357–365.

A

Annexe A : Classement thématique et chronologique des publications de Guye

Liste des abréviations

1. **Arch.** : Archives des Sciences Physiques et Naturelles.
2. **C.R.** : Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris.
3. **Helv. Phys. Act.** : Helvetica Physica Acta.
4. **Soc. Helv. Sc. Nat.** : Société Helvétique des Sciences Naturelles.
5. **J. Ch. Phys.** : Journal de Chimie physique.

A.1 Polarisation rotatoire : 1889-1893

Polarisation rotatoire du chlorate de soude : 1889

1. Guye, C.E. (1889), 'Sur le pouvoir rotatoire du chlorate de soude cristallisé', *Arch.* **21**, 266-268 (Guye, 1889b).

2. Guye, C.E. (1889), 'Sur le pouvoir rotatoire du chlorate de soude cristallisé', *C.R.* **108**, 348-350 (Guye, 1889c).
3. Guye, C.E. (1889), 'Sur la polarisation rotatoire du chlorate de soude (Mémoire complet)', *Arch.* **22**, 130-169 (Guye, 1889a).

Pouvoir rotatoire du quartz : 1892-1893

1. Soret, C. et Guye, C.E. (1892), 'Sur le pouvoir rotatoire du quartz aux basses températures', *Soc. Helv. Sc. Nat.*, 5, 6, 7 septembre 1892, *Arch.* **28**, 346-347.
2. Soret, C. et Guye, C.E. (1892), 'Sur le pouvoir rotatoire du quartz aux basses températures (note préliminaire)', *C.R.* **115**, 1295-1296.
3. Soret, C. et Guye, C.E. (1893), 'Sur la polarisation rotatoire du quartz aux basses températures (Mémoire complet)', *Arch* **29**, 108 et 242-255.

A.2 Courants alternatifs, Induction, Capacité des lignes : 1893-1901

Calcul des coefficients d'induction : 1893-1895

1. Guye, C.E. (1893), 'Développement donné à la méthode de Maxwell pour le calcul des coefficients d'induction', *Arch.* **29**, 427-429.
2. Guye, C.E. (1893), 'Calcul des coefficients d'induction (notes préliminaires)', *Soc. Helv. Sc. Nat.*, 4, 5, 6 septembre 1893, **30**, 360-361.
3. Guye, C.E. (1894), 'Sur la moyenne distance géométrique de tous les éléments d'un ensemble de surfaces et son application au calcul des coefficients d'induction', *C.R.* **118**, 1329-1332.
4. Guye, C.E. (1894), 'Sur la moyenne distance géométrique de tous les éléments d'un ensemble de surfaces et son application au calcul des coefficients d'induction', *Arch.* **32**, 480-492 et 574-587. (Prix Davy de l'Université de Genève) (Guye, 1894)
5. Guye, C.E. (1894), 'Coefficient de self induction de n fils parallèles égaux et équidistants dont les sections sont réparties sur une circonférence', *C.R.* **119**, 219-221.
6. Guye, C.E. (1895), 'Les Coefficients d'induction des conducteurs multiples', *Eclair.* **3**, 20.

Induction dans les câbles : 1893-1895

1. Guye, C.E. (1893), 'Chute de potentiel dans un câble concentrique employé comparativement avec des courants continus et alternatifs (note préliminaire)', *Arch.* **29**, 322.
2. Guye, C.E. (1894), 'Influence des armatures sur les phénomènes d'induction dans les câbles ', *Arch.* **32**, 539-542.
3. Guye, C.E. (1894), 'Influence des armatures sur les phénomènes d'induction dans les câbles', *Eclair.* **1**, 193.
4. Guye, C.E. (1895), 'Induction dans les câbles armés', *Arch.* **33**, 200.
5. Guye, C.E. (1895), 'Induction dans les câbles armés', *Arch.* **3**, 309.
6. Guye, C.E. (1895), 'Induction dans les câbles armés. Expériences de la station centrale de Genève', *Arch.* **33**, 242-251.

Capacité dans les lignes : 1896-1901

1. Guye, C.E. (1896), 'Sur l'emploi des coefficients de capacité et de selfinduction par unité de longueur dans les calculs de la propagation du courant électrique', *Arch.* **1**, 273.
2. Guye, C.E. (1900), 'Sur la capacité des conducteurs symétriques soumis à des tensions polyphasées', *C.R.* **130**, 711.
3. Guye, C.E. (1900), 'Sur la répartition des courants et des tensions en régime périodique établi le long d'une ligne polyphasée symétrique présentant de la capacité', *C.R.* **130**, 1382.
4. Guye, C.E. (1900), 'Les courants de capacité dans les lignes polyphasées symétriques et leur représentation graphique', *Eclair.* **23**, 408.
5. Guye, C.E. (1900), 'Calcul graphique d'une ligne souterraine triphasée concentrique', *Eclair.* **22**, 83.
6. Guye, C.E. (1900), 'Phénomène de capacité dans un câble triphasé symétrique et armé', *Arch* **9**, 289-290.
7. Guye, C.E. (1900), 'Mesure de capacité sur deux câbles triphasés symétriques à très haute tension', *Arch.* **9**, 298-300.
8. Guye, C.E. (1901), 'Sur la valeur absolue du potentiel dans les réseaux isolés de conducteurs présentant de la capacité', *C.R.* **133**, 388.

9. Guye, C.E. (1901), 'Sur la valeur absolue du potentiel dans les réseaux isolés de conducteurs présentant de la capacité', *Arch.* **12**, 427-428.

Courants polyphasés

1. Guye, C.E. (1900), 'Propagation du courant dans les lignes polyphasées (note préliminaire)', *Arch.* **9**, 586.
2. Guye, C.E. (1900), 'Contribution à l'étude de la propagation des courants polyphasés (Mémoire complet)', *Arch.* **9**, 532-552.

A.3 Recherches sur l'arc voltaïque : 1902-1908

Travail avec B. Monasch : 1902-1903

1. Guye, C.E. et Monasch, B. (1902), 'Recherches sur l'arc alternatif de faible intensité entre électrodes métalliques (note préliminaire)', *Soc. Helv. Sc. Nat.*, 7, 8, 9 et 10 septembre 1902, *Arch.* **14**, 382-384.
2. Guye, C.E. et Monasch, B. (1903), 'L'arc de faible intensité entre électrodes métalliques', *Arch.* **15**, 349-351.
3. Guye, C.E. et Monasch, B. (1903), 'Recherches sur l'arc alternatif de faible intensité entre électrodes métalliques (Mémoire complet)', *Eclair.* **34**, 305 et 416, et **35**, 18.

Travail avec T. Romilly : 1906

1. Guye, C.E. et Romilly, T. (1906), 'Le fonctionnement de la lampe à arc au mercure avec anode de platine', *Arch.* **21**, 541-542.

Travail avec Mlle L. Zebrikoff : 1907

1. Guye, C.E. et Zebrikoff, L. (1907), 'Sur la différence de potentiel de l'arc à courant continu entre électrodes métalliques', *C.R.* **145**, 169-170 ; et *Congrès de l'Association Française pour l'Avancement des Sciences*, 1907.
2. Guye, C.E. et Zebrikoff, L. (1907), 'L'arc voltaïque entre électrodes métalliques', *Arch.* **23**, 95-96.

3. Guye, C.E. et Zebrikoff, L. (1907), 'L'arc électrique jaillissant entre métaux', *Soc. Helv. Sc. Nat.*, 30 juillet 1907, *Arch.* **24**, 370-371.
4. Guye, C.E. et Zebrikoff, L. (1907), 'Sur la différence de potentiel de l'arc à courant continu entre électrodes métalliques', *Arch.* **24**, 549-574.

Travail avec A. Bron : 1908

1. Guye, C.E. et Bron, A. (1908), 'Différence de potentiel et stabilité de l'arc alternatif entre métaux', *Arch.* **25**, 453-473 et 549-576.
2. Guye, C.E. et Bron, A. (1908), 'Différence de potentiel et stabilité de l'arc alternatif entre métaux', *C.R.* **146**, 1090-1093.
3. Guye, C.E. et Bron, A. (1908), 'La stabilité de l'arc alternatif, fonction du poids atomique des métaux électrodes', *C.R.* **147**, 49-51.

Travail personnel et Conférences

1. Guye, C.E. (1903), 'Observations sur la lampe à arc au mercure', *Arch.* **17**, 116.
2. Guye, C.E. (1908), 'Un puissant auxiliaire de la science et de l'industrie : l'arc voltaïque, son mécanisme et ses applications (Conférence faite à la Société helvétique des sciences naturelles)', Publication dans *Travaux du laboratoire de physique - Deuxième série*, Société générale d'imprimerie : Genève.
3. Guye, C.E. (1914), 'Stabilisation de l'arc électrique entre métaux (Résumé d'une conférence à la Société vaudoise des Sciences naturelles, 18 mars 1914)', *Arch.* **38**, 81.

A.4 Etude du magnétisme : 1902-1914

Hystérésis et dissipation de l'énergie

Travail avec Beni Herzfeld : 1902-1903

1. Guye, C.E. et Herzfeld, B. (1902), 'Dissipation de l'énergie dans le fer aux hautes fréquences (note préliminaire)', *Soc. Helv. Sc. Nat.*, 7, 8, 9 et 10 septembre 1902, *Arch.* **14**, 380-382.

2. Guye, C.E. et Herzfeld, B. (1903), 'Hystérésis aux fréquences élevées', *Arch.* **15**, 461-464.
3. Guye, C.E. et Herzfeld, B. (1903), 'Hystérésis aux fréquences élevées', *C.R.* **136**, 957.

Travail avec A. Schidlof : 1904-1905

1. Guye, C.E. et Schidlof, A. (1904), 'Énérgie dissipée dans le fer par hystérésis aux fréquences élevées (note préliminaire)', *Arch* **18**, 410-412.
2. Guye, C.E. et Schidlof, A. (1904), 'Énérgie dissipée dans le fer par hystérésis aux fréquences élevées', *C.R.* **139**, 517.
3. Guye, C.E. et Schidlof, A. (1904), 'L'hystérésis magnétique aux fréquences élevées dans le fer, le nickel et les aciers au nickel (1^{er} mémoire)', *Arch.* **18**, 576-593.
4. Guye, C.E. et Schidlof, A. (1905), 'L'hystérésis magnétique aux fréquences élevées dans le nickel et les aciers au nickel', *C.R.* **140**, 369.
5. Guye, C.E. et Schidlof, A. (1905), 'L'hystérésis magnétique aux fréquences élevées dans le nickel et les aciers au nickel($2^{ème}$ mémoire)', *Arch.* **19**, 60-79 et 159-187.

Aimantation

Travail avec L. de la Rive : 1909

1. de la Rive, L. et Guye, C.E. (1909), 'Sur l'orientation magnétique dans une agglomération de petits aimants', *Arch.* **27**, 622.
2. de la Rive, L. et Guye, C.E. (1909), 'Sur l'orientation magnétique dans une agglomération de petits aimants', *Arch.* **28**, 105-118.
3. de la Rive, L. et Guye, C.E. (1909), 'Sur l'orientation magnétique dans une agglomération de petits aimants', *C.R.* **148**, 161.

Travail avec Mlle Karpowa : 1910-1911

1. Guye, C.E. et Karpowa (1910), 'Aimantation en fonction de la fréquence', *Le Radium* **7**, 241.

2. Guye, C.E. et Karpowa (1910), 'Aimantation en fonction de la fréquence', *Arch.* **30**, 326-328.
3. Guye, C.E. et Karpowa (1911), 'Aimantation en fonction de la fréquence', *C.R. du Congrès International de Radiologie et d'Électricité*, (Bruxelles, 1911).

Travail avec Mlle Albert : 1914

1. Guye, C.E. et Albert (1914), 'Sur l'aimantation alternative aux fréquences élevées', *Arch.* **37**, 20-36.

A.5 Élasticité des solides et frottement intérieur : 1903-1929

Élasticité des solides

Travail avec A. Fornaro : 1903-1904

1. Fornaro, A. et Guye, C.E. (1903), 'Détermination de la variation résiduelle du 2^{me} module d'élasticité d'un fil d'invar soumis à des changements de température (note préliminaire)', *Arch.* **17**, 101-104.
2. Fornaro, A. et Guye, C.E. (1904), 'Détermination de la variation résiduelle du 2^{me} module d'élasticité d'un fil d'invar soumis à des changements de température (Mémoire complet)', *Arch.* **17**, 597-619.

Travail avec H. Woelfe : 1907

1. Guye, C.E. et Woelfe, H. (1907), 'Propriétés élastiques de l'invar', *Arch.* **24**, 635.
2. Guye, C.E. et Woelfe, H. (1907), 'Étude sur les variations du 2^{me} module d'élasticité de l'invar en fonction de la température', *Arch.* **24**, 63-76 et 159-171.

Frottement intérieur

Travail avec S. Mintz : 1908

1. Guye, C.E. et Mintz, S. (1908), 'Étude sur la viscosité de quelques métaux en fonction de la température', *Arch.* **26**, 136-166 et 263-278.

Travail avec V. Freedericksz : 1908-1910

1. Guye, C.E. et Freedericksz, V. (1908), 'Note sur la viscosité des métaux aux basses températures', *Arch.* **26**, 679.
2. Guye, C.E. et Freedericksz, V. (1909), 'Sur le frottement intérieur des solides aux basses températures', *C.R.* **149**, 1066-1069.
3. Guye, C.E. et Freedericksz, V. (1910), 'Frottement intérieur des solides aux basses températures (Mémoire complet)', *Arch.* **29**, 49-61, 157-174 et 261-289.

Travail avec H. Schapper : 1909-1910

1. Guye, C.E. et Schapper, H. (1909), 'Frottement intérieur de quelques métaux aux basses températures', *C.R.* **150**, 962.
2. Guye, C.E. et Schapper, H. (1910), 'Frottement intérieur de quelques métaux aux basses températures', *Arch.* **30**, 133-151.

Travail avec E. Berchten : 1912

1. Guye, C.E. et Berchten, E. (1912), 'Sur le frottement intérieur du cuivre aux températures élevées (note préliminaire)', *Arch.* **33**, 355-356.

Travail avec Mlle Vassiliev : 1913-1914

1. Guye, C.E. et Vassiliev (1913), 'Note sur le frottement intérieur des verres', *Arch.* **35**, 383-384.
2. Guye, C.E. et Vassiliev (1914), 'Frottement intérieur des verres en fonction de la température', *Arch.* **37**, 214-225 et 301-323.

Travail avec P. Voïkoff : 1915

1. Guye, C.E. et Voïkoff, P. (1915), 'Nouvelles déterminations du frottement intérieur aux basses températures, suivies d'une remarque de M. Guye sur la nature du frottement intérieur', *Arch.* **39**, 85-87.

Travail avec Einhorn : 1916

1. Guye, C.E. et Einhorn (1916), 'Sur le frottement intérieur des fils de quartz aux basses températures (note préliminaire)', *Arch.* **41**, 157-158.
2. Guye, C.E. et Einhorn (1916), 'Sur le frottement intérieur des fils de quartz aux basses températures', *Arch.* **41**, 287-311 et 376-400 et 457-468.

Travail avec P. Barbier : 1918

1. Guye, C.E. et Barbier, P. (1918), 'Remarques sur le frottement intérieur des fils de quartz aux basses températures', *Arch.* **46**, 326-328.

Travail avec A. Morein : 1920

1. Guye, C.E. et Morein, A. (1918), 'Sur le frottement intérieur des fils de quartz aux basses températures', *Arch.* **2**, 351-371.

Travail avec A. Pazziani : 1924

1. Pazziani, A. et Guye, C.E. (1924), 'Influence du recuit sur le frottement intérieur des fils de quartz aux températures élevées', *Arch.* **6**, 47-64 et 89-115.

Travail avec A. Dupraz : 1929

1. Guye, C.E. et Dupraz, A. (1929), 'Influence du champ magnétique sur le frottement intérieur des corps solides magnétisables', *Helv. Phys. Act.* **11**, 320.

Travail personnel

1. Guye, C.E. (1910), 'Note relative aux expériences de MM. C.-E. Guye et S. Mintz sur la viscosité des métaux en fonction de la température', *Arch.* **29**, 474-475.

2. Guye, C.E. (1912), 'Remarques sur le frottement intérieur aux basses températures et les phénomènes irréversibles au voisinage du zéro absolu', *Arch.* **34**, 166-169.
3. Guye, C.E. (1912), 'Le frottement intérieur des solides, ses variations avec la température', Conférence faite à l'Assemblée générale de la Société française de Physique en avril 1912, *Arch.* **34**, 535-561.

A.6 Appareils et dispositifs de mesures

Le bolomètre

1. Guye, C.E. (1890), 'Conditions de sensibilité des bolomètres', *Arch.* **24**, 425 et 669-670.
2. Guye, C.E. (1892), 'Le problème du Pont de Wheatstone appliqué au bolomètre', *Arch.* **27**, 26-47.

Mesure de puissance

Wattmètre électrostatique

1. Guye, C.E. (1897), 'Wattmètre électrostatique', *Arch.* **4**, 589.
2. Guye, C.E. (1898), 'Wattmètre électrostatique', *Eclair.* **15**, 114.

Courants alternatifs

1. Guye, C.E. (1898), 'Méthode pour déterminer la puissance dans un appareil parcouru par des courants sinusoïdaux de fréquence élevée', *Arch.* **6**, 446-450.
2. Guye, C.E. (1899), 'Essais sur le compteur d'énergie pour courants alternatifs du Dr E. Batault', *Eclair.* **21**, 290.

Mesure électrothermique

1. Guye, C.E. et Bernoud, A. (1901), 'Mesure électrothermique de la puissance des courants rapidement variables', *Arch.* **12**, 314-316.
2. Guye, C.E. et Bernoud, A. (1904), 'Sur une nouvelle méthode électrothermique pour mesurer la puissance moyenne des courants de fréquence élevée', *Arch.* **17**, 51-77.

Électromètre sous pression

1. Guye, C.E. et Tscherniawsky, A. (1910), 'La mesure de très hauts potentiels par l'emploi d'électromètres sous pression', *C.R.* **150**, 911.
2. Guye, C.E. et Tscherniawsky, A. (1913), 'La mesure de très hauts potentiels par l'emploi d'électromètres sous pression (Mémoire complet)', *Arch.* **35**, 565-593.

Divers

1. Guye, C.E. et Kazanteff, L. (1901), 'Mesures de très faibles capacités', *Arch.* **12**, 313-314.
2. Guye, C.E. (1903), 'Appareil pour démontrer la propagation des mouvements ondulatoires', *Arch.* **17**, 51.
3. Guye, C.E. (1906), 'Nouveau condensateur à vide à verre argenté', *Arch.* **22**, 89.
4. Guye, C.E. (1913), 'Principe d'une méthode dynamique de mesure instantanée des forces (note préliminaire)', *Arch.* **36**, 270-272.
5. Guye, C.E. (1924), 'Sur l'étalonnage électrothermique des champs oscillants en vue des applications biologiques', *Arch.* **6**, 135-136.

A.7 Variation de l'inertie de l'électron avec la vitesse et Relativité : 1906-1921

Charge spécifique de l'électron

1. Guye, C.E. (1906), 'Valeur du rapport de la charge à la masse de l'électron', *Arch.* **21**, 346-348.
2. Guye, C.E. (1906), 'Sur la valeur la plus probable du rapport $\frac{\epsilon}{\mu_0}$ de la charge à la masse de l'électron dans les rayons cathodiques', *C.R.* **142**, 833-836.
3. Guye, C.E. (1906), 'Sur la valeur la plus probable du rapport $\frac{\epsilon}{\mu_0}$ de la charge à la masse de l'électron dans les rayons cathodiques', *Arch* **21**, 461-468.

Travail avec S. Ratnowsky

1. Guye, C.E. (1909), 'Détermination expérimentale de la variation d'inertie des corpuscules cathodiques en fonction de la vitesse et sur le principe de relativité', *Arch.* **29**, 339-340.

Travail avec Lavanchy

1. Guye, C.E. et Lavanchy, C. (1914), 'Nouvelle détermination du rapport $\frac{\epsilon}{\mu}$ pour les rayons cathodiques de grande vitesse. Note préliminaire.', *Arch.* **39**, 88.

Complément

1. Guye, C.E. (1918), 'Tables pour le calcul des masses longitudinales, transverses et cinétiques dans la relativité', *Arch. Supplément* **46**, 81-82.

A.8 Potentiel explosif dans les gaz à pression élevée : 1905, puis 1916-1926

Travaux expérimentaux

Travail avec H. Guye : 1905

1. Guye, C.E. et Guye, H. (1905), 'L'influence des fortes pressions sur le potentiel explosif dans différents gaz (note préliminaire)', *Arch.* **20**, 460-461.
2. Guye, C.E. et Guye, H. (1905), 'Sur la rigidité électrostatique des gaz aux pressions élevées', *C.R.* **140**, 1320.
3. Guye, C.E. et Guye, H. (1905), 'Recherches sur la décharge disruptive dans les gaz aux pressions élevées (Mémoire complet)', *Arch.* **20**, 5-27 et 111-127.

Travail avec C. Stancescu : 1917

1. Guye, C.E. et Stancescu, C. (1917), 'Sur le potentiel explosif dans l'anhydride carbonique aux pressions élevées', *C.R.* **164**, 602-605.
2. Guye, C.E. et Stancescu, C. (1917), 'Décharge disruptive dans les gaz comprimés (Mémoire complet)', *Arch.* **43**, 131-160.

Travail avec P. Mercier et J. Weiglé : 1920-1925

1. Guye, C.E. et Mercier, P. (1920), 'Recherches sur le potentiel disruptif dans l'anhydride carbonique aux pressions élevées', *Arch.* **2**, 30-49 et 99-124.
2. Guye, C.E. et Mercier, P. (1922), 'Recherches complémentaires sur le potentiel explosif dans l'anhydride carbonique aux pressions élevées', *Arch.* **4**, 27-37.
3. Guye, C.E. et Weiglé, J.J. (1922), 'Sur l'élimination de l'inégale répartition des ions au voisinage des électrodes dans les expériences sur le potentiel explosif', *Arch. Supplément* **4**, 44-45.
4. Guye, C.E. et Weiglé, J.J. (1922), 'Sur la loi de Paschen dans l'anhydride carbonique aux pressions élevées', *Arch. Supplément* **4**, 47 [1].
5. Guye, C.E. et Weiglé, J. (1923), 'Potentiel disruptif dans les gaz aux pressions élevées et champ moléculaire', *Arch.* **5**, 19-36 et 85-96 et 197-207.
6. Guye, C.E. et Mercier, P. et Weiglé, J. (1925), 'Sur le potentiel explosif dans l'anhydride carbonique aux pressions élevées (Résumé des résultats numériques obtenus)', *C.R.* **180**, 1251-1253.

Travaux théoriques

1. Guye, C.E. (1916), 'Sur l'équation de la décharge disruptive et la possibilité de trois sortes de potentiels explosifs', *Arch.* **42**, 20-23.
2. Guye, C.E. (1916), 'Sur l'hypothèse d'un champ moléculaire électrostatique dans les gaz comprimés et le phénomène de la décharge disruptive (1^{re} note)', *Arch.* **42**, 14-19.
3. Guye, C.E. (1916), 'Champ moléculaire et décharge disruptive (2^{me} note)', *Arch.* **42**, 374-377.
4. Guye, C.E. (1919), 'L'équation de la décharge disruptive dans les mélanges de gaz (remarque)', *Arch.* **1**, 50.
5. Guye, C.E. (1920), 'Sur le rôle de l'inégale répartition des ions dans le phénomène de la décharge disruptive', *Arch.* **2**, 419-421.
6. Guye, C.E. (1922), 'Sur l'extension de la loi de Paschen aux fluides polarisés', *C.R.* **174**, 445-448.
7. Guye, C.E. (1922), 'Sur la loi de Paschen généralisée au cas de diélectriques polarisables', *Arch.* **4**, 3-9.

1. Les publications A.8 3 et 4 ne sont pas référencées dans la liste des publications de Guye.

8. Guye, C.E. (1923), 'Remarques sur le rôle du champ moléculaire dans la décharge disruptive', *Arch.* **5**, 65.
9. Guye, C.E. (1926), 'Sur l'équation du potentiel explosif dans un mélange de deux gaz', *Arch.* **8**, 43-45.

A.9 Rotation électromagnétique de la décharge et diamètres moléculaires : 1917-1927

Travaux expérimentaux

Travail avec A. Rothen : 1921

1. Guye, C.E. et Rothen, A. (1921), 'Rotation de la décharge électrique dans les gaz sous l'action d'un champ magnétique', *Arch. Supplément* **3**, 87-88.
2. Guye, C.E. et Rothen, A. (1921), 'Sur la rotation de la décharge électrique dans un champ magnétique', *Arch.* **3**, 529[2].
3. Guye, C.E. et Rothen, A. (1921), 'Recherches sur la rotation de la décharge électrique dans un champ magnétique', *Arch.* **3**, 441-470.

Travail avec R. Rudy : 1922-1923

1. Guye, C.E. et Rudy, R. (1922), 'Nouveau mode de détermination des diamètres moléculaires par la rotation électromagnétique de la décharge dans les gaz', *Arch. Supplément* **4**, 4-6.
2. Guye, C.E. et Rudy, R. (1922), 'Nouveau mode de détermination des diamètres moléculaires par la rotation électromagnétique de la décharge dans les gaz', *C.R.* **174**, 382-384.
3. Guye, C.E. et Rudy, R. (1923), 'Sur la rotation de la décharge électrique dans un champ magnétique', *Arch.* **5**, 182-196 et 241-258.

Travail avec B. Luyet : 1927

1. Guye, C.E. et Luyet, B(1927), 'Recherches sur la rotation de la décharge électrique dans un gaz décomposable', *Arch.* **9**, 191-192 et 247-263.

2. Cette référence n'apparaît pas dans la liste des publications de Guye.

Travaux théoriques

1. Guye, C.E. (1917), 'Théorie de la rotation de la décharge électrique sous l'influence d'un champ magnétique', *Arch.* **44**, 489-491.
2. Guye, C.E. (1923), 'Sur l'entraînement des gaz dans la rotation électromagnétique de la décharge', *C.R.* **177**, 1104-1106.
3. Guye, C.E. (1923), 'Sur la rotation spontanée de la décharge électrique', *C.R.* **177**, 1282-1285.
4. Guye, C.E. (1923), 'Sur l'entraînement des gaz dans la rotation électromagnétique de la décharge électrique', *Arch. Supplément* **5**, 121-123.
5. Guye, C.E. (1926), 'Remarque sur le mode d'évaluation du libre parcours moyen des centres électrisés dans un mélange de gaz et son application à la théorie de la rotation de la décharge', *Arch.* **8**, 45-47.

A.10 Physico-chimie et Biologie

Ascension de la sève

1. Guye, C.E. (1925), 'Problèmes d'énergétique en relation avec le problème de l'ascension de la sève (1^{re} note)', *Arch.* **7**, 39-45.
2. Guye, C.E. (1925), 'Problèmes d'énergétique en relation avec le problème de l'ascension de la sève. Ascension entretenue (2^{me} note)', *Arch.* **7**, 63-68.
3. Guye, C.E. (1925), 'Ascension spontanée d'un liquide le long d'une paroi qu'il mouille', *Arch.* **7**, 78-80.
4. Guye, C.E. (1926), 'Sur le mouvement d'ascension d'un liquide le long de la paroi interne d'un tube mouillé et sa relation possible avec le problème de l'ascension de la sève', *Arch.* **8**, 111-114.

Propagation de l'imbibition

1. Guye, C.E. et Archinard, I. (1929), 'Contribution à l'étude dynamique de l'amalgation', *Helv. Phys. Acta* **2**, 343.
2. Guye, C.E. et Saïni, H. (1929), 'Contribution expérimentale à l'étude énergétique des phénomènes d'imbibition', *Helv. Phys. Acta* **2**, 445.

3. Guye, C.E. (1934), 'Considérations théoriques sur la propagation de l'imbibition', *Helv. Phys. Acta* **7**, 581.
4. Guye, C.E. (1934), 'Sur la propagation ascendante de l'imbibition', *Helv. Phys. Acta* **7**, 662.
5. Guye, C.E. (1934), 'Quelques cas particuliers de propagation de l'imbibition', *Helv. Phys. Acta* **7**, 850.

Frontières de la physique et de la biologie

1. Guye, C.E. (1906), 'La précision des lois physiques', *Athenaeum*, 21 juillet 1906 (Londres).
2. Guye, C.E. (1906), 'La comparaison des lois physiques et des lois biologiques', *Athenaeum*, 4 août 1906 (Londres).
3. Guye, C.E. (1917), 'L'évolution des phénomènes physico-chimiques et le calcul des probabilités', *J. Ch. Phys.* **15**, 215.

A.11 Sujets divers

Bicyclette

1. Guye, C.E. (1893), 'Détermination expérimentale du travail des vélocipédistes', *La Nature*, 22 avril 1893.
2. Guye, C.E. (1896), 'Sur le rôle du poids et de l'inertie dans la bicyclette', *La Nature*, 5 septembre 1896.
3. Guye, C.E. (1896), 'Sur le rôle du poids et de l'inertie dans la bicyclette', *Le Génie Moderne* 1896, 311.

Autres sujets d'électricité

1. Guye, C.E. (1896), 'Quelques mots sur le Congrès international des électriciens à Genève', *Eclair.* **8**, 27.
2. Guye, C.E. (1896), 'L'électricité à l'Exposition nationale de Genève', *Journal officiel de l'Exposition*, 1896.
3. Guye, C.E. (1896), 'L'électricité à l'Exposition nationale de Genève', *Eclair.* **9**, 49, 155, 217, 251, 438 et 481.

4. Guye, C.E. (1896), 'L'électricité à l'Exposition nationale de Genève', *Arch.* **2**, 113-128 et 217-227 et 445-466.
5. Guye, C.E. (1896), 'Le transport de force Chèvres-Genève', *Eclair.* **6**, 145 et **8**, 167.
6. Guye, C.E. (1897), 'Le problème de l'éclairage', *Bibliothèque universelle (Suisse)*, 1897.
7. Guye, C.E. (1898), 'Le calcul graphique des courants alternatifs industriels', *Eclair.* **14**, 321 et 503, **15**, 363 et **16**, 397.
8. Guye, C.E. (1899), 'Les transports d'énergie à haute tension aux Etats-Unis', *Eclair.* **21**, 241, 452 et 487.
9. Guye, C.E. (1897), 'Quelques remarques sur les variations de température d'un conducteur parcouru par des courants alternatifs', *Arch.* **3**, 254-262.
10. Guye, C.E. (1904), 'Champ magnétique de convection dû à la charge électrique terrestre', *Arch.* **28**, 408-409.
11. Guye, C.E. (1915), 'Equations de condition des courants dérivés semblables et leurs applications', *Séance de la Société Suisse de Physique - Lausanne*, 1^{er} mai 1915, *Arch.* **39**, 436.

Champ électrostatique et chaleur

1. Guye, C.E. et Denso, P. (1904), 'Sur la réalisation d'un champ électrostatique tournant de haute tension', *Eclair.* **39**, 201.
2. Guye, C.E. et Denso, P. (1904), 'Chaleur dégagée dans la paraffine soumise à l'action d'un champ électrostatique de fréquence élevée (note préliminaire)', *Arch.* **19**, 101-102.
3. Guye, C.E. et Denso, P. (1905), 'Chaleur dégagée dans la paraffine soumise à l'action d'un champ électrostatique de fréquence élevée (Mémoire complet)', *Eclair.* **44**, 361 et 401.
4. Guye, C.E. et Denso, P. (1905), 'Chaleur dégagée dans la paraffine soumise à l'action d'un champ électrostatique de fréquence élevée', *C.R.* **140**, 433.

Radioactivité

1. Guye, C.E. et Schidlof, A. (1906), 'Action des rayons X sur les corps radioactifs (note préliminaire)', *Arch.* **22**, 299-300.

2. Guye, C.E. et Schidlof, A. et Kernbaum, M. (1908), 'Les rayons X ont-ils une action sur les substances radioactives', *Arch.* **25**, 26-35.
3. Sarasin, E. et Guye, C.E. et Micheli, J. (1907), 'Radioactivité des eaux de Lavey-les-Bains ', *Arch.* **25**, 74-75.
4. Guye, C.E. et Sarasin, E. et Micheli, J. (1908), 'Radioactivité des eaux de Lavey-les-Bains', *Arch.* **25**, 36-44.
5. Guye, C.E. (1936), 'La radioactivité provoquée', *Journal de Genève*, 13 janvier 1936.

Electron

1. Guye, C.E. (1904), 'Les hypothèses modernes sur la constitution électrique de la matière - Rayons cathodiques et corps radioactifs', *Journal de Chimie physique* **2 : 9** et **3 : 3**, reproduit dans *Travaux du laboratoire de physique - Première série*, fascicules 5 et 8, Société générale d'imprimerie : Genève.
2. Guye, C.E. (1916), 'Unités électroniques', *Arch.* **41**, 66-68.
3. Guye, C.E. (1924), 'Sur l'explosion partielle ou totale d'un électron dans la théorie des quanta', *Arch.* **6**, 4-6.
4. Guye, C.E. (1924), 'Sur l'inertie d'une couche électrique sphérique en mouvement divergent et l'émission de quanta', *Arch.* **6**, 6-8.

Physique moléculaire

1. Guye, C.E. (1922), 'La loi de répartition des vitesses moléculaires et les actions de surface (1^{re} note)', *Arch.* **4**, 132-135.
2. Guye, C.E. (1922), 'La loi de répartition des vitesses moléculaires et les actions de surface (2^{me} note)', *Arch.* **4**, 153-157.
3. Guye, C.E. (1924), 'La loi des répartitions des vitesses moléculaires et les actions de surface', *J. Ch. Phys.* **21 :1**, 15 et 24.
4. Guye, C.E. (1941), 'Quelques remarques sur l'application aux chocs moléculaires de la théorie des circuits dépourvus de résistance', *Helv. Phys. Acta* **14**, 583.

Théorie cinétique

1. Guye, C.E. (1923), 'Interprétation cinétique de la règle de Van't Hoff', *C.R.* **176**, 836-838.
2. Guye, C.E. (1927), 'Essai de théorie cinétique des accidents de la circulation dans une agglomération urbaine', *Arch.* **9**, 280-293.

Relativité

1. Guye, C.E. (1917), 'Exposé de quelques conséquences du principe de relativité', *Arch.* **44**, 487-489.
2. Guye, C.E. (1933), 'La matière et l'énergie', *Journal de Genève*, 25 mars 1933.
3. Guye, C.E. (1933), 'La solidarité de l'espace et du temps', *Journal de Genève*, 7 mai 1933.
4. Guye, C.E. (1938), 'Sur la possibilité de vérifier expérimentalement la relation $\nu = \nu_0\sqrt{1-\beta^2}$ de la relativité restreinte', *C.R.* **206**, 29-31.
5. Guye, C.E. (1938), 'Rectification à la note précédente', *C.R.* **206**, 224.
6. Guye, C.E. (1938), 'Relativité, résonnance et diffusion moléculaire', *C.R.* **206**, 961.

Conférences

1. Guye, C.E. (1922), 'Les tendances de la physique moderne et la notion de matière. (Conférence à l'Assemblée générale de la Société Helvétique des Sciences Naturelles réunie à Berne le 25 août 1922)', *Arch.* **4**, 270-296.
2.

B

Annexe B : Reproduction de documents originaux d'une importance particulière

B.1 L'affaire Pierre Curie

Ces documents manuscrits sont conservés aux archives du *Département de l'instruction Publique* à Genève, sous la côte 1985 va 5.3.26 Université 7.

Lettre de Curie à Chodat, le 2 mai 1900. Document n^o 1

Il s'agit de la première des lettres conservées aux archives du *Département de l'instruction publique* du long échange entre Pierre Curie et les autorités genevoises. Charles Soret démissionne officiellement en mai 1900. Cette décision a été prise quelques mois plus tôt puisque la lettre suivante nous apprend que le Doyen de la faculté des sciences, Robert Chodat, est entré en contact avec le physicien français avant le mois de mai. Nous n'avons pas trouvé trace de ces premières discussions.

Paris, le 2 mai 1900

Cher Monsieur,

Je me décide à rester à Paris. Vous savez quelles sont les raisons qui me retiennent. J'ai à faire à l'école de physique et de chimie un cours qui m'intéresse et qui est, je crois, utile. Le directeur de cette école désire me garder. D'autrepart il me semble que je ne serai peut-être pas capable de mener à bien, en même temps, mes recherches scientifiques et les nombreuses occupations que comporteraient mes fonctions à Genève. Etant naturellement lent, il me semble que je n'aurais pas la liberté d'esprit nécessaire pour songer à mes recherches.

J'ai été très touché par la proposition si flatteuse de l'Université, et ce n'est pas sans regrets que je renonce à aller à Genève. Les montagnes, le lac, l'Université si libre et si animée et surtout l'accueil si excellent que j'avais reçu me faisait prévoir là une vie très agréable. Aussi, fort indécis, j'ai mis bien du temps avant de vous donner une réponse définitive. La question était si importante pour moi et les miens que j'espère que vous m'excuserez.

Veuillez, je vous prie, agréer pour M^{me} Chodat et pour vous-même tous mes remerciements pour l'accueil que j'ai reçu et que je n'oublierai pas.

Veuillez me croire votre bien dévoué.

Pierre Curie

Veuillez je vous prie être mon interprète auprès de M^{r} et M^{me} Duparc, de M^{r} et M^{me} Soret, de M^{r} Guye [1] et leurs transmettre mes salutations et mes remerciements.

J'espère que vous ne nous garderez pas rancune et vous nous ferez le plaisir de venir nous voir lors de votre passage à Paris.

Mais le 11 juin, Curie envoie un télégramme à Chodat lui annonçant qu'il "accepte" [2]. Sept jours plus tard, il confirme cette décision au conseiller d'état, Georges Favon, à nouveau par télégramme [3].

Lettre de Chodat à Favon, le 20 juin 1900. Document n^{o} 4

Dans cette lettre, Chodat justifie le choix fait de proposer à Curie, le poste laissé vacant par la démission de Soret. Il expose les conditions posées par le français en préalable à sa venue à Genève [4]. Il les justifie par la valeur de ses travaux dont la retombée ne pourrait être à son sens que bénéfique pour la renommée de l'Université.

1. Il s'agit de Philippe-Auguste, alors membre du Conseil de la Faculté des sciences.
2. Document n^{o} 2.
3. Document n^{o} 3.
4. La lettre de Curie explicitant ces conditions est annexée à celle de Chodat. Elle n'est pas reproduite ici.

Genève, le 20 juin 1900.

Monsieur le président

Monsieur le professeur Duparc et votre serviteur ont, comme vous l'aviez désiré, examiné avec soin la solution à donner à la question soulevée par la démission de Monsieur le Prof. Soret.

Il s'agissait de savoir s'il y avait lieu d'appeler à Genève une personnalité étrangère qui serait capable de donner un éclat spécial à l'enseignement de la Physique.

Etude faite, deux noms s'imposaient à notre attention. En première ligne un français, en seconde ligne, un hollandais [5].

M. Duparc et moi, nous nous sommes rendus à Paris, où nous avons consulté les hommes qui nous paraissaient avoir, à la fois, le plus d'autorité et le plus d'impartialité.

Nous avons ainsi pu nous convaincre que, de l'avis unanime, M. le Prof. Curie est considéré, non seulement à l'étranger mais également à Paris, comme le plus éminent des jeunes physiciens c. a. d. de ceux qui n'ont pas encore forcé les portes de l'Institut ou de la Sorbonne.

Il n'y a en France qu'une voix pour déclarer que M. Pierre Curie est une capacité hors ligne et qui n'occupe actuellement qu'une situation bien inférieure à son talent.

A Paris chacun doutait fort du succès de notre mission ; gens arrivés et en train d'arriver tous pensaient que M. Curie hésiterait beaucoup à abandonner Paris.

Mais à Paris comme partout ailleurs il n'y a pas toujours des situations vacantes dans le haut enseignement pour les savants même de première ligne. Aussi, M. le Prof. Lippmann, l'éminent titulaire de la chaire de physique à la Sorbonne et Mons. Liard directeur de l'enseignement supérieur en France, étaient-ils d'avis que M. Curie devrait accepter l'offre que nous étions chargés de lui faire.

M. Lippmann est directement intervenu en secondant nos efforts. M. Liard que j'ai vu mardi, m'a promis de faire son possible, soit pour encourager M. Curie à accepter, soit pour lui faire accorder, au cas ou il se déciderait à partir pour Genève, toutes les facilités compatibles avec la loi française relative à la pension de retraite, au cas ou il rentrerait en France plus tard.

Après ces pourparlers assez longs nous sommes arrivés à décider M. Curie à accepter d'entrer en discussion sérieuses.

Les conditions préliminaires posées par M. Curie sont les suivantes :

1^o L'autorisation à accorder à Madame Curie de donner un cours ([6] Madame Curie étant licencié en physique et en mathématique, la Faculté des Sciences

5. Nous ne savons pas de qui il s'agit.
6. La parenthèse n'est pas fermée.

ne pourrait que donner un avis favorable quant à son inscription au rôle des Privat-Docent

2^o Un préparateur (il existe déjà dans la personne de M. Margot)

3^o Un traitement fixe de fs 8000

([7]M. Duparc et moi, nous pensons que cette demande est modeste, vu la valeur exceptionnelle du professeur. Au cas où M. Curie hésiterait encore au dernier moment nous pensons qu'il serait sage d'élever ce traitement à fs. 9000

4^o Une indemnité pour changement de domicile (à fixer après entente avec le propriétaire de M. Curie.)

5^o éventuellement augmentation du crédit du laboratoire.

M. Duparc et moi nous pensons qu'il serait absolument nécessaire d'accorder au nouveau professeur deux assistants à fs 1200

M. Soret n'en avait point, nous pensons que cette situation ne serait acceptée par aucun autre physicien de mérite

M. Curie est un homme de progrès à l'esprit ouvert et qui ne peut manquer de contribuer à l'évolution si intéressante que subit la Faculté des Sciences.

Ses récentes découvertes sur les métaux isolés par lui, le Radium et le Polonium, sont si importants que l'attention des physiciens du monde entier serait tournée vers Genève

Il y a dans ce domaine des métaux radiants des travaux nombreux à faire et qui seront à mettre à côté de ceux de Röntgen sur les rayons X. Nous avons vu chez M. Curie toute une série de résultats surprenants.

Au point de vue des études, il y aurait à notre Faculté des Sciences, un professeur aimant l'enseignement, désireux de faire des élèves.

M. Curie est actuellement professeur à l'école municipale de Physique et de Chimie.

Sans être un orateur, M. Curie s'exprime avec facilité et en un langage correct. Son amour pour la Physique et l'enseignement en feront, nous n'en doutons point, un professeur très apprécié.

L'appel de M. Curie à Genève serait considéré dans le monde savant, comme honorant à la fois le savant et le gouvernement

Au point de vue strictement local cette nomination ne pourrait être contestée. M. Curie l'emporte en effet, pas sa situation et son autorité scientifique exceptionnelle sur tous les concurrents locaux qu'on serait tenté de lui opposer.

L'avenir de notre haute école, dépend en grande partie, sinon presqu'exclusivement, du choix que le gouvernement fera des professeurs. Il s'agit que les chaires maîtresses soient occupées par des hommes de première valeur.

7. La parenthèse n'est pas fermée.

Mieux vaut n'avoir qu'un petit nombre de chaires bien dotées et pourvues de titulaires éminents, que de multiplier les enseignements et de n'y pouvoir appeler que des hommes de seconde valeur.

L'avenir moral et économique dépend dans une certaine mesure de ce que vaudront nos institutions d'instruction publique et de l'esprit dans lequel se fera l'enseignement.

Comme M. Curie viendra à Genève la semaine prochaine (Mardi) pour voir les installations et prendre une décision il serait très désirable que nous puissions aboutir alors à une entente provisoire.

Je vous serais très reconnaissant de bien vouloir m'accorder une audience Samedi le 22 juin.

Veuillez agréer, Monsieur le Président l'expression de ma haute et respectueuse considération.

Le Doyen R. Chodat.

Lettre de Curie à Chodat, le 10 juillet 1900. Document n^o 5

Curie envoie finalement sa lettre d'acceptation du poste offert par l'université de Genève le 10 juillet 1900. Il fait néanmoins part de ses hésitations quant à la santé de sa femme. De plus, il demande des renseignements sur le laboratoire de physique.

Paris, le 10 juillet 1900

Cher Monsieur,

j'accepte la situation qui m'est offerte par la ville de Genève. Je désire cependant avoir encore l'approbation de mon beau frère médecin, bien au courant de la santé de ma femme et à qui j'ai demandé s'il ne pensait pas que le climat soit trop rude pour elle en hiver, j'ai écrit en Pologne et j'attends la réponse. On m'a dit beaucoup de mal dernièrement de la bise noire de Genève et c'est ce qui a soulevé ce dernier scrupule.

Nous avons fini par nous accoutumer à l'idée de ce changement d'existence et après vous avoir refusé je regrettais quelque peu.

Cependant je ne me dissimule pas que j'entreprends une tâche un peu lourde pour moi et que le succès n'est pas certain.

J'écris à M. Liard pour lui demander une audience.

Je n'ai pas une idée absolument exacte des instruments appartenant au service de physique de l'université. Je désirerais obtenir que M. Margot m'envoie une liste des appareils principaux. Je n'ai pas besoin de connaître la liste des appareils historiques et des appareils qui servent pour le cours. Je voudrais seulement avoir la liste des appareils mis à la disposition des élèves en manipulation et des appareils d'un usage courant dans le laboratoire.

En particulier je voudrais connaître la liste des galvanomètres (avec l'ordre de grandeur de leur résistance), boîtes de résistances, capacités, electrodynamomètres voltmètres ampères mètre. Je vais visiter avec soin les appareils de physique de l'exposition et prendre en note ce qui pourrait nous être utile.

Enfin il me serait bien nécessaire d'avoir des notions un peu plus précises sur les connaissances que possèdent les élèves au sortir du gymnase de Genève et aussi celui des études de l'université s'il en existe. Je sais bien que les programmes ne signifient pas grand choses, ils donnent toutefois une idée de la nature des matières traitées dans chaque cours. Un ancien cahier d'élève du gymnase ou de l'université me serait encore plus utile.

Agréez, Monsieur, je vous prie l'assurance de mes sentiments dévoués

Veuillez je vous prie présenter mes respectueux hommages à M^{me} et M^{lle} Chodat.

P. Curie

Je prends la liberté de vous demander de vouloir bien m'envoyer le journal dont vous m'avez parlé et où sont publiées les listes de maisons à louer dans les environs de Genève. Cette question est très importante pour nous, car le seul plaisir de mon père est de soigner son jardin et je tiens à ce qu'il en ait un qui lui plaise. — On m'a recommandé des maisons situées entre Genève et le Salève.

Lettre de Curie à Chodat, le 15 juillet 1900. Document n^o 9.

Cinq jours après avoir affirmé son intention de venir à Genève, Curie change d'avis. La raison principale mise en avant est d'ordre scientifique. Il pense ne pas pouvoir poursuivre ses recherches dans de bonnes conditions.

Paris, le 15 juillet 1900

Cher Monsieur,

Nous avons changé d'avis et nous ne nous décidons pas à aller à Genève.

C'est en voyant la difficulté qu'il y aurait pour nous à poursuivre les travaux en cours et le traitement du radium, que ce revirement s'est produit. Notre départ équivaut à un retard considérable dans notre travail et à une désorganisation complète de ce que nous faisons actuellement avec Debierne. Cette raison jointe aux autres nous a décidés.

Je regrette infiniment de vous avoir causé tant de retard et je reconnais être tout-a-fait ans mon tort après la dépèche 'acceptation que je vous ai envoyée dernièrement. Je suis profondément touché des dispositions que vous et vos collègues aviez témoignées à mon égard et de l'accueil qui m'était réservé à Genève.

Agréez, je vous prie, l'assurance de mes sentiments dévoués.

P. Curie

Je vous prie de croire que les conditions qui m'étaient offertes par la Ville de Genève me paraissaient satisfaisantes à tous les points de vue.

Séance de la Commission de préavis pour la vocation de M. P. Curie à la Chaire de Physique. Document n^o 7

Le lendemain à Genève se tient la "Commission chargée de se prononcer sur la vocation de M. le Professeur P. Curie"[8]. La lettre de Curie n'est pas encore arrivée.

Séance de la Commission de préavis pour la vocation de M. P. Curie à la Chaire de Physique.

Le 16 juillet 1900 à 11 heures.

Présidence de M. E. Martin, Recteur.

Présents : M.M. D'Espine, Montet, Chodat, Eternod et Seitz

~~M. R. Naville se~~

M. Gautier, R., délégué de la Faculté des Sciences

M.M. Soret, Fivaz[9] et Guye délégués du Département de l'Instruction Publique.

M. R. Naville se fait excuser. M. Alfred Martin, absent.

Le Recteur donne lecture de la lettre de M. le chef du Département convoquant la commission, puis il donne la parole aux membres de la commission dans l'ordre accoutumé.

M. Gautier. La Faculté dans sa dernière séance a entendu les rapports des personnes compétentes. Le préavis unanime de la Faculté est d'approuver la proposition d'appeler M. Curie à la chaire de physique afin d'avoir une illustration scientifique pour succéder à M. Soret.

M. Gautier a rencontré deux fois M. Curie lors d'une visite que ce dernier fit aux Laboratoires de physique. Il est réservé, sérieux, sympathique modeste, et fera travailler dans le même esprit que son regretté prédécesseur.

M. Soret. M. Curie est un homme extrêmement distingué. Il a commencé à publier il y a 20 ans ; il a beaucoup publié, moins comme volume que comme valeur, nombre d'idées. Une notice sur ses travaux scientifiques a été publiée par lui l'an dernier. M. Soret indique brièvement quels sont les principaux travaux de M. Curie, et ses découvertes, en particulier dans le domaine de la cristallographie

8. Le compte rendu de cette commission est envoyé par le Recteur Ernest Martin au Conseiller d'état Favon le jour même. Lettre de Martin à Favon datée du 16 juillet 1900. Document non numéroté.

9. Mal orthographié. Il faut écrire Fivat.

physique[10]. Il a fait des recherches qui prouvent une grande habileté comme expérimentateur.

En collaboration avec Madame Curie, il a commencé des travaux sur les corps radio-actifs qui ont attiré l'attention.

M. Curie a travaillé avec des collaborateurs, ce qui est la preuve qu'il saura faire travailler, et il a toujours trouvé quelque chose. Après les gens arrivés à l'Institut, etc. il est un des premiers.

Né en 1859 ; Licence 1877. Doctorat 1895 ; Prix de l'Institut avec son frère, la même année.

Préparateur à la Faculté des Sciences de Paris. Depuis 1895 professeur à l'Ecole municipale de Physique et Chimie de Paris, et répétiteur à l'Ecole Polytechnique.

M. Guye a connu M. Curie à Paris, pendant près de trois ans, il y a assez longtemps. Il était considéré par ses camarades d'étude et de travail comme un de ceux qui doivent arriver.

M. Guye n'a jamais rencontré un savant si modeste, donnant des conseils désintéressés si précieux. C'est sa modestie qui ~~est cause~~ l'a empêché d'obtenir à Paris une situation plus élevée. Il a refusé toute décoration.

C'est, dans le monde scientifique, un de ceux qui sont le plus en vue, en laissant de côté ceux qui sont arrivés au couronnement de leur carrière. En France, il est considéré comme un des premiers[11]. En Allemagne, en Angleterre, on le regarde comme un grand nom.

Comment enseignement, M. Guye ne crois pas qu'il soit très éloquent, mais il est clair et très apprécié. Ds l'enseignement au laboratoire, il est hors de pairs.

M. Guye estime que l'appel de M. Curie est une occasion qu'il ne faut point manquer et que nous devons chaleureusement appuyer.

M. Fivat est incompétent pour parler de questions de physique, mais édifié par ce que les physiciens viennent de dire. Il appuye donc la proposition.

M. Chodat. Le dép^t ayant désiré attirer à Genève une illustration pour remplacer M. Soret avait chargé M.M. Duparc et Chodat d'une mission. Quelques noms d'hommes distingués avaient été cités.

Plusieurs autorités scientifiques, entre autre M. Lippmann, ont déclaré M. Curie hors ligne. Pas une note discordante.

~~M. Curie hésita longtemps, se trouvant bien où il était.~~

M. Chodat défend l'idée du département pour les même raisons que M.M. Soret et Guye.

10. En renvoi en marge : "Certains de ses travaux montrent qu'il est bon mathématicien. Il a montré dans les divers domaines de la physique habileté expérimentale."

11. Dans le texte, en dessous de cette phrase : "~~Il est peut être le — Il n'est ni Normalien, ni Polytechnicien, cela a retardé son avancement~~".

M. Chodat ajoute que M. Lippmann pense que nous ferions une acquisition de premier ordre, et que M. Liard, ~~le regarde Président~~ Directeur de l'Enseignement supér. ~~le~~ regarde M. Curie comme son premier sujet.

M. Montet appuie le préavis.

M. Eternod. Nous avons été fort inquiets en apprenant la démission de M. Soret. Nous sommes heureux de voir dans son successeur, si c'est M. Curie, un digne continuateur. La chaire de physique intéresse vivement les médecins. M. Eternod croit être l'interprète de la Faculté de médecine en appuyant le préavis.

M. le vice-recteur a été vivement intéressé par ~~cet~~ l'exposé sur les travaux et sur l'homme. Il est heureux de l'acquisition d'un savant distingué qui est en même temps un homme modeste, soucieux de la seule science.

M. le Secrétaire aurait aimé qu'une inscription permit aux élèves des professeurs de physique de notre université de prouver les fruits de leurs enseignements. Il regrette qu'un Genevois n'occupe plus cette chaire où tant de Genevois illustres se sont succédés, mais il s'incline devant les titres ~~du *illisible*~~ de M. Curie.

M. le Recteur en partageant dans une certaine mesure ces sentiments, se ~~joint~~ rallie aux opinions énoncées par les autres membres de la commission.

M. Chodat ~~cela~~ dit que la vocation adressée à M. Curie ne préjuge en rien la valeur des candidats éventuels qui ~~pourraient~~ auraient pu se présenter en cas d'inscription.

La commission préavise à l'unanimité moins une abstention en faveur de la vocation à adresser par le Département à M. Pierre Curie.

Le 17 juillet 1900. Documents n^o 6 et 8

Le lendemain de la séance de la commission, Chodat a reçu la lettre de Curie. Il fait part de cette nouvelle à Favon, qui écrit à son tour à Curie, certainement le jour même.

Lettre de Chodat à Favon, le 17 juillet 1900. Document n^o 6

Genève le 17 juillet 1900

Monsieur le Président,

J'ai le regret de vous communiquer une nouvelle dépêche de M^r Curie déclarant qu'il a changé d'avis. Je pense que ce document remet tout en question et que l'appel n'aurait plus de signification.

Je suis fort ennuyé de la conclusion de toutes ces démarches ; je vous prie M^r le Président de croire que j'ai fait tout ce qui était possible pour faire aboutir cette affaire.

Veuillez agréer Monsieur le Président l'expression de ma haute et respectueuse considération

R. Chodat

Lettre de Favon à Curie, non datée. Document n^o 8

Dans son courrier, Favon se montre encore prêt à accueillir Curie à Genève.

Curie, professeur, Ecole physique et chimie, rue Lhomond, Paris.

Votre refus nous arrive au moment où le Conseil d'Etat unanime allait vous appeler avec joie à la chaire de physique. C'est un vrai chagrin pour mes collègues et moi. Si vous revenez sur votre décision, nous ferons tout pour vous faciliter dans vos travaux.

Favon, conseiller d'Etat, président du Département de l'Instruction Publique.

Lettre de Curie à Chodat, le 18 juillet 1900. Document n^o 10

À nouveau, Curie change d'avis. Il l'annonce à Chodat le 18 juillet.

Paris le 18 juillet 1900

Cher Monsieur,

J'accepte définitivement d'aller à Genève. Je viens de recevoir la dépèche de M^r Favon et j'ai été très touché de cette démarche. J'ai aussi reçu une lettre de mon beau frère qui connaît le climat de Genève et le considère comme très bon pour la santé de ma femme.

Votre lettre m'avait déjà d'ailleurs tranquilisé à ce sujet.

Je pense que vous ne m'en voudrez pas trop du retard que je vous ai causé, c'était un gros changement dans mon existence actuelle dont je n'ai pas à me plaindre.

Je regrette surtout le petit centre de travail dont je faisais partie, et que je vais quitter, la collaboration de Debierne m'était surtout précieuse.

Je vous remercie tout particulièrement pour la très grande amabilité dont vous avez fait preuve envers moi.

Votre tout dévoué, P. Curie

Ci-joint les renseignements demandés

Si je pouvais à un moment donné faire venir Debierne à Genève ce serait pour moi une très grande satisfaction et pour l'université une excellent recrue. Debierne est très bon chimiste et physicien, il est élève diplomé de l'Ecole de physique et de chimie et licencié es sciences physiques.

Extrait des registres du Conseil d'Etat du 20 juillet 1900

Vu la démission de M. le professeur SORET en qualité de professeur de physique à la Faculté des Sciences ;

Vu la correspondance échangée entre le Département de l'Instruction publique et M. P. Curie ;

Vu le rapport de la Commission prévue par l'article 134 de la loi sur l'Instruction publique ;

Sur la proposition du Département de l'Instruction publique ;

ARRETE :

De nommer M. P. CURIE, professeur ordinaire de physique dans la Faculté des Sciences de l'Université de Genève.

De présenter au Grand Conseil un arrêté législatif fixant à frs. 10.000.- le traitement de M. le professeur CURIE.

Une indemnité dont le chiffre sera fixé ultérieurement, sera accordée à M. CURIE pour changement de résidence.

Monsieur CURIE donnera au minimum 4 heures de cours par semaine et sera chargé de la direction du laboratoire de physique.

Le crédit du laboratoire de physique sera augmenté après entente avec le professeur. Il sera adjoint au laboratoire de physique deux assistants dont le traitement annuel est fixé à 1200 francs.

Après examen des ressources du laboratoire, la collection des instruments de physique sera complétée.

Lettres de Curie à Favon et Chodat, le 22 juillet. Documents n^o 11 et 12

Quatre jours plus tard, Curie écrit à Favon et à Chodat. Il remercie le Conseiller d'état, et discute de l'organisation de sa nouvelle fonction avec le Doyen.

Lettre à Favon. Document n^o 11

Paris, le 22 juillet 1900

Monsieur,

Je vous prie d'agréer mes remerciements et de les transmettre au conseil d'état de Genève. Je suis très touché de la façon dont je suis accueilli par le gouvernement et par l'Université de Genève.

Je vous prie d'agréer, Monsieur, mes salutations sincères et l'assurance de mes sentiments dévoués.

Lettre à Chodat. Document n^o 12

Paris, le 22 juillet 1900

Cher Monsieur,

Me voici donc Génevois, grace à votre obstination bienveillante. Il ne s'agit plus que de savoir si je réussirai dans mon enseignement et c'est pour le moment ma plus grosse préoccupation et c'est un gros risque. Je pense en effet qu'il est beaucoup plus difficile de faire un enseignement très général comme celui qui m'est demandé que d'en faire un plus spécialisé comme celui que je fais maintenant.

Comme je ne sais improviser, je désirerais me faire le plus tôt possible une idée plus précise de ce que j'aurai à enseigner et de la façon dont je pourrai le faire. Je désirerais donc avoir le plus de renseignements possibles sur les cours qui sont faits jusqu'ici et sur les connaissances des élèves qui suivent ces cours.Je désirerais beaucoup employer même dans le cours pour les étudiants en médecine la notation différentielle, la notion de dérivée et les formules les plus usuelles de la trigonométrie.

Au fond, les notions sur les infiniment petits sont des notions élémentaires et fondamentales qui devraient être enseignées des le début des mathématiques, des que l'on considère une courbe, une quantité qui varie, une vitesse, ces notions deviennent nécessaires pour bien comprendre. Le professeur de Mathématiques que j'ai eu le plaisir de voir chez vous à Genève ~~semble~~ pense également que ces notions devraient être enseignées dès le début.

Peut-être serait-il bon d'avoir au commencement de l'année quelques leçons de mathématiques pour les élèves qui auraient des connaissances insuffisantes sur ce point.

Je crois que je ferai deux enseignements le 1er pour les étudiants en médecine et qui comportera probablement 3 ou 4 cours par semaine le deuxième, qui correspondra au cours de licence par exemple je pourrais pour ce deuxième enseignement traiter la thermodynamique et l'électricité avec 2 cours par semaine et M^{me} Curie pourrait se charger de l'optique et de l'acoustique avec 2 autres cours.

Toutefois, ma femme préférerait ne faire de cours que dans le second semestre cette année afin d'avoir le temps de s'installer à Genève et de s'habituer à ses fonctions d'assistant.

Pour ce qui est du chiffre de crédit pour le budget ordinaire et le crédit d'installation du laboratoire je vous demanderai de fixer vous même les sommes que l'on peut convenablement demander à la Ville de Genève. Ces chiffres n'ont rien d'absolu. La somme de 4500 francs comme crédit annuel me parait admissible si l'on n'a pas a payer le gaz, l'éclairage et la force motrice. (à Paris, du moins

ces dépenses là font une somme très forte dans un laboratoire).

Il me semble bien difficile de vous faire en quelques jours une liste des appareils à acheter

Lettre de Curie à Chodat, le 27 juillet 1900. Document n^o 13

Quelques jours plus tard, Curie annonce son intention de venir à Genève pour, en particulier, visiter le laboratoire. Il annonce de plus ne pas avoir donné sa démission à l'École de physique et de chimie.

Paris, le 27 juillet 1900

cher Monsieur,

M^{me} Curie et moi, nous avons dans l'intention d'aller à Genève dans les premiers jours de la semaine prochaine dans le but de louer une villa et de convenir avec vous des arrangements les meilleurs pour le laboratoire.

Veuillez avoir l'obligeance de nous dire si ce moment vous paraît convenable ou s'il vaut mieux reculer notre voyage et le remettre après le congrès de physique c'est à dire après le 15 août.

Je n'ai pas encore donné ici ma démission officielle, j'ai seulement prévenu officieusement le directeur de mon Ecole. Je voudrais bien savoir quand ma situation à Genève sera définitivement réglée pour permettre à mon directeur de déclarer ma chaire vacante ; Il me demande de le faire le plus tôt possible. Si j'ai bien compris l'arrête pris à mon égard doit encore être approuvé par le grand Conseil.

Je voudrais aussi savoir à partir de qu'elle époque j'entrerai officiellement en fonction afin de fixer à la même date ~~la prep de ma dem~~ l'arrêt de mes fonctions à l'Ecole de physique.

J'ai été reçu récemment par M^r Liard qui m'a dit de très belles paroles mais n'a pas voulu garantir mes droits à la retraite comme pour M^r Bard. Il dit que cela est impossible parce que je suis actuellement au service de la Ville de Paris, et non au service de l'état.

Ma femme est parvenue à préparer un peu (très peu) de radium pur, quelques centigrammes seulement ; examiné au spectroscope par M^r Demarçay ce produit ne montre que les raies du radium avec du baryum à l'état de trace.

Veuillez présenter mes respects à M^{me} et M^{lle} Chodat et me croire votre tout dévoué. P. Curie

Le mois d'août 1900

Le mois d'août 1900 constitue une période d'incertitude pour Curie qui ne sait plus comment revenir sur son acceptation sans trop froisser les susceptibilités genevoises.

Il explique ne pas être le meilleur homme pour le poste de professeur de physique et propose même Georges Sagnac pour le remplacer. Il avance également que les débats qui ont lieu dans la presse genevoise sur les exigences formulées pour quitter Paris pourraient nuire au conseiller d'état Favon qui aurait alors tout intérêt à appeler un autre professeur.

Nous ne reproduisons pas ici ces longues lettres de Curie en date des 16 et 29 août 1900, numérotées respectivement 16 et 17 dans le dossier CURIE des archives du *Département de l'instruction publique*.

Lettre de Curie à Favon, le 19 septembre 1900. Document n^o 18

Après ses tergiversations, Curie écrit à Favon, le 19 septembre 1900. Cette lettre sera jointe à la suivante, écrite à Chodat. Les deux seront envoyées 2 jours plus tard, comme le note Chodat dans sa lettre à Favon en date du 23 septembre 1900 [12]

> Paris, le 19 septembre 1900
>
> Monsieur Favon, Conseiller d'Etat à Genève.
>
> Monsieur,
>
> J'ai l'honneur de vous envoyer ma démission de la fonction de professeur titulaire à l'Université de Genève à laquelle le conseil d'état du gouvernement gènevois avait bien voulu m'appeler.
>
> Vous savez que j'avais longuement hésité avant d'accepter cette situation cependant si honorable et si avantageuse pour moi à bien des points de vue.
>
> Pour diverses raisons, je suis tout à fait convaincu aujourd'hui que j'ai eu tort d'accepter et je préfère revenir sur ma décision, quand il en est temps encore, au lieu de m'engager pour la vie et de le regretter ensuite. Je préfère rester dans ma situation actuelle, plus modeste, mais qui je crois convient mieux à mes facultés et à mon caractère.
>
> Je m'empresse de reconnaître que l'Université et le gouvernement gènevois ont agi d'une façon parfaite vis à vis de moi. Je regrette beaucoup d'avoir mis si longtemps à me rendre un compte exact de la situation et je vous prie d'agréer toutes mes excuses.

12. Document n^o 20.

> Je crois que la ville de Genève a tout avantage à prendre un professeur qui viendrait à elle sans aucun regret.
>
> Je connais un physicien éminent, ayant déjà fait des recherches remarquables, en qui j'aurais plus confiance d'en moi-même pour remplir ces fonctions et qui accepterait avec empressement d'aller à Genève, si on lui proposait une situation de professeur. Bien d'autres désireraient une situation aussi enviable et je ne doute pas que la physique dans la ville de Genève ne soit dans l'avenir comme dans le passé dignement représentée.
>
> Agréez, je vous prie, Monsieur, l'assurance de mes sentiments respectueux et dévoués.
>
> P. Curie

Le lendemain, il informe Chodat de sa décision. Il reprend les mêmes arguments que précédemment [13].

Télégramme de Chodat à Curie, non daté. Document n^o 21

Chodat ne peut répondre à Curie par courrier. Il est "mortifié" [14] par le refus du français. Sa réponse se fait par télégramme.

> Professeur Pierre Curie
>
> Ecole de Physique et de Chimie Rue Lhomond
>
> Paris
>
> Transmets votre décision au Département elle sera remise demain au Conseil d'Etat Ne vous cache pas que cela sera considéré par tout Genève comme un scandal moral
>
> Chodat

Lettre de Curie à Chodat, le 27 septembre 1900. Document n^o 22

Curie répond en annonçant qu'il va partir enseigner à l'Université de Paris.

> Paris, le 27 septembre 1900
>
> Cher Monsieur,
>
> Me voici encore en train de vous créer des ennuis.
>
> M^r Darboux et M^r H. Poincaré m'ont proposé hier de la part de M^r Liard de me charger d'un enseignement qui vient d'être déclaré vacant à l'Université de Paris.

13. Document n^o 19.
14. Lettre à Favon, le 23 septembre 1900. Document n^o 20.

Ils proposent en même temps une situation pour ma femme et de plus je conserverais mes collaborateurs.

Je suit fortement tenté d'accepter cette occasion d'entrer dans la 1^{re} université de mon pays et ce désir est si légitime qu'il me semble que, dans ces conditions, le scandale dont vous me parliez ne se produirait pas. Je dois aller voir M^r Liard Samedi.

Je vous prie de croire que je suis désolé en songeant aux ennuis que je vous cause.

P. Curie

Lettre de Curie à Favon, le 1^{er} octobre 1900. Document n^o 24

Le 27 septembre, au matin, Curie envoie un télégramme [15] à Chodat dans lequel il lui dit :

Puisque vous trouvez cela si grave si temps encore je retire ma démission

Ce télégramme a-t-il été envoyé avant ou après la lettre précédente ? Toujours est-il que, quatre jours plus tard, Curie envoie officiellement sa démission au Conseiller d'état Favon.

le 1^{er} octobre 1900

Monsieur Favon, Conseiller d'Etat, à Genève.

Monsieur,

j'ai l'honneur de vous adresser ma démission des fonctions de professeur de physique à l'Université de Genève. Fonctions auxquelles le Conseil d'Etat de la Ville de Genève avait bien voulu m'appeler.

Un enseignement de physique important vient d'être déclaré vacant à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris et l'on m'offre de me charger de cet enseignement. D'autre part en restant à Paris, je ne perdrai pas le concours de mon collaborateur principal dans mes recherches scientifiques, collaborateur que je ne pouvais emmener à Genève.

Je regrette bien vivement la belle situation qui m'était faite par la Ville de Genève et je suis vivement contrarié de l'embaras que va vous causer ma démission tardive.

J'avais en effet été profondément touché par l'accueil que me faisaient l'Université et le gouvernement gènevois.

Je vous envoie toutes mes excuses et vous prie de considérer qu'il s'agit pour moi d'une occasion peut être unique d'entrer dans la première université de mon pays.

15. Document n^o 23.

Agréez, je vous prie, Monsieur le Conseiller, l'assurance de tout mon respect.
P. Curie

Lettre de Favon à Curie, le 5 octobre 1900. Document n^o 25

La réponse de Favon vient clore l'épisode de l'appel de Curie à Genève.

Genève le 5 octobre 1900.
à Monsieur Curie, Professeur, à PARIS
Monsieur le Professeur,
Ce matin, le Conseil d'Etat a accepté votre démission.
Je n'ai pas à vous juger ; si vous croyez avoir bien agi, c'est parfait.
Je constate seulement que vous avez rompu un engagement formel dans des conditions propres à mettre dans l'embarras des hommes qui avaient en vous la plus entière confiance.
Agréez mes salutations empressées.
(S) FAVON. (Conseiller d'Etat chef du Departement.)

B.2 L'appel à Guye

Ces documents sont conservés aux archives du *Département de l'instruction Publique* à Genève, sous la côte 1985 va 5.3.26 Université 7.

Lettre de Guye à Chodat, le 22 octobre 1900

Le 22 octobre, Guye répond à une lettre datée du 19 [16] dans laquelle lui était proposé le poste de professeur de physique pour l'année 1900-1901.

> Monsieur le Professeur Chodat, Doyen de la Faculté des Sciences – Genève
>
> Monsieur le Doyen
>
> J'ai l'honneur de vous accuser réception de votre lettre du 19 et me proposant de me charger de l'enseignement de la Physique et de la direction des laboratoires dépendant de cet enseignement pendant l'année universitaire 1900 – 1901.
>
> Permettez-moi d'abord de vous dire encore une fois, combien j'ai été sensible à cette proposition et de vous prier de transmettre mes plus sincères remerciements à Monsieur le Conseiller d'Etat Favon, Président du Département de l'Instruction Publique.
>
> Après avoir réfléchi à cette proposition, je viens vous informer que je me décide à l'accepter dans les conditions formulées par votre lettre, étant entendu, ainsi que vous avez bien voulu me le dire verbalement que les fonctions temporaires dont je me chargerais seront considérées comme un titre important au moment d'une nomination définitive.
>
> Je vous prie donc d'informer Monsieur le Président de ma décision et de vous serais obligé de me faire savoir quand je dois me mettre à sa disposition.
>
> Veuillez bien, Monsieur le Doyen, agréer l'expression de ma considération très distinguée.
>
> C.E. Guye
>
> Genève le 22 Octobre 1900

Séance de la Commission chargée de donner un préavis sur la vocation de M. Guye Ch.Eug. à la chaire de physique

Après une nomination à titre temporaire, Guye obtient finalement le poste de professeur de physique début novembre 1900. La séance que nous retranscrivons ci-dessous montre qu'après l'accord unanime sur les qualités de Guye, le débat se

16. Lettre que nous ne possédons pas.

détourne vite sur les conditions d'accès aux postes de professeur à l'Université de Genève.

> Séance de la Commission chargée de donner un préavis sur la vocation de M. Guye, Ch. Eug. à la chaire de physique
>
> Le 2 novembre 1900 à 3 h.
>
> Présidence de M. Ernest Martin, Recteur.
>
> Présents . M.M. Chodat, Alf. Martin, d'Espine, Eternod, Seitz
>
> M. Raoul Gautier, délégué de la Faculté.
>
> M.M. Duparc, Sarasin et Soret, délégués du Département.
>
> M. le Doyen de la Fac. des Lettres se fait excuser ; il a cours à la même heure.
>
> M. le Recteur donne lecture de la lettre du Dép^t qui convoqua la commission.
>
> M. R. Gautier, ne donnera pas un préavis de physicien, mais la Faculté des Sc. l'a chargé à l'unanimité de donner un préavis favorable à la vocation de M. Charles Eug. Guye.
>
> M. Guye est Neuchatelois, il a 36 ans. Il a fait 6 années d'étude à notre Univ., principalement avec M. Soret, et a encore étudié 2 ans à l'Ecol. polyt. de Zurich. Il est bachelier de 1887, docteur de 1889. Depuis 1890, il a enseigné comme privat docent à Genève ; puis dans les cours du soir. Il a été appelé à Zurich comme assistant de M. le prof. Weber pendant 3 semestres et est devenu privat-docent à ___. Tous les étés il a donné depuis lors un cours de privat doc. à Zurich, surtout dans le domaine de l'électricité. L'an dernier il a été chargé d'un cours, sur le calcul graphique des courants alternatifs, et il a remplacé le prof. Parnot dans son laboratoire. Il a donné dans les Archives des Sc. physiques et naturelles plusieurs travaux. Il s'est surtout occupé d'électricité, sans négliger les autres parties de la physique. Il a l'habitude des laboratoires et saura diriger les travaux ~~sans avoir encore pu faire ses preuves dans la direction d'un grand laboratoire~~.
>
> La Faculté donne donc un préavis favorable en réponse à la demande du chef du Dép^t.
>
> M. Guye est actuellement le seul Suisse de langue française qui soit chargé de cours à Zurich.
>
> M. Soret se joint au préavis de la Faculté des Sciences. Les titres de M. Guye lui paraissent mériter d'être pris en considération. M. Guye a fait sa thèse sous la direction de M. Soret, qui a fait avec lui un travail sur l'optique. Il l'a déjà apprécié quand il faisait sa thèse. Depuis lors, il a publié des Mem., portant surtout sur l'électricité, les courants alternatifs. Il est bon mathématicien pour un physicien. A prem. vue, ses travaux paraissent un peu théoriques, mais ils sont confirmés par des expériences soigneusement faites. M. Soret a consulté à Bâle M. Hagenbach Birchoff, très compétent sur les questions de personnes. Il déclare que M. Ch. Eug. Guye est très avantageusement connu d^s la Suisse

allemande. En 2^d lieu, à l'exception de M. Guillaume, c'est M. Guye qui a fait le plus grand nombre de publications de valeur, dans ces dernières années en Suisse. A Zurich, on est favorable à son enseignement.

Il est très actif ; il a donné des travaux de vulgarisation dans le journal „l'Eclairage électrique". Il sait se mettre en avant sans réclame exagérée.

M. Duparc a eu M. Guye comme élève. Très intelligent, travailleur, „débrouillard". Il s'est occupé d'optique, sujet qui intéresse M. Duparc, et il l'apprécie. Des membres du Conseil de l'Ecole Polyt. lui en ont dit le plus grand bien. Il travaille dans le domaine de l'électricité, mais ~~connaît~~ aussi dans d'autres domaines de la physique. Il est au courant des applications pratiques de l'électricité. M. Duparc est d'avis que cet appel est parfaitement justifié.

M. Sarasin pense, comme M. Soret, que M. Guye est un excellent physicien, d'une science très solide, qui publie beaucoup, et rien à la légère cependant. Il lui paraît désigné pour cette chaire.

M. Sarasin l'a admiré à la Soc. de phys. la parfaite clarté de son exposition. Il allie la physique math. à la physique expérimentale dans une juste mesure. M. Sarasin est heureux de voir M. Guye appelé à ce poste.

M. Sarasin fait cependant une réserve. On ne doit user qu'exceptionnellement de l'appel. Il s'expliquait pour M. Curie, il se justifie encore pour M. Guye. M. Sar. connaît les raisons qui militent en faveur de cet appel ; il fallait ne pas perdre de temps. Sa remarque n'est point un blâme, mais il fait ses réserves, dans le cas où les circonstances soient différentes.

M. Sarasin fait en terminant l'éloge de M. Guye.

M. Chodat n'a plus grand chose à ajouter. Dire plus serait dire trop. Mais il veut mettre la Com. au courant de ce qui s'est passé depuis l'appel de M. Curie. Il avait accepté, hésité, refusé ; il était venu visiter ~~[illible]~~ les laboratoires ; quant enfin tout fut arrangé, il envoya sa démission. Le Dép^t lui fit savoir d'une façon énergique qu'elle serait mal vue. Il la retira ; 3 jours après, il envoya sa démission définitive. Le Dép^t écrivit à M. Chodat, alors à Paris, de faire des démarches auprès de M. Guillaume, Suisse. Il est peut être regrettable qu'on n'ait pas commencé par lui. Il s'est fort bien conduit, a répondu, fort vite, qu'il était retenu à Paris.

Le Dép^t a renoncé aux candidatures à l'étranger, il s'est éclairé sur les candidats nationaux, et l'opinion unanime des personnes compétentes consultées a été en faveur de M. Guye. Le temps pressant, le Dép^t s'est décidé à prendre la mesure citée en premier dans la loi : la vocation.

~~Ce n'est pas une décision éliminatoire sans étude. Auparavant, on a fait des recherches. M. Chodat a tenu à cet examen ; le plus apte devant être appelé~~.

~~il~~ M. Chodat péavise favorablement pour l'appel de M. Guye.

M. D'Espine. L'avis de la Faculté, de membres de la Fac. qui représentent le Dép^t, d'un physicien de profession concordent. M. D'Espine s'incline et appuie le préavis.

~~Quant à la question soulevée par M. Sarasin, M. D'Espine se demande dans le cas particulier quel est celui des 2 procédés qui donne le meilleur résultat~~. Le fait qu'il y a eu une consultation discrète qui a donné des ~~résultats~~ réponses concordantes suffit à montrer que le Dép^t a bien agi dans ce cas particulier en évitant à des concurrents très dignes [bas de page coupé]

M. Alf. Martin. La question posée est relative à la vocation. Les réserves de M. Martin ne portent pas sur la personne. La question de principe est importante. L'appel ~~est~~ devient-il une règle, ou reste-t-il une exception ? Si l'on approuve ce qu'a dit M. D'Espine, on évitera toujours l'appel par égard pour tous sauf un.

M. Martin estime que l'inscription doit être la règle. Tous les ~~concurrents~~ gens compétents ont le droit d'être appréciés. Quand il y a vocation, cela devient une question de personne.

L'enquête qui a été faite l'a été hors de l'Université. Enlever l'inscription est diminuer le rôle de l'Univ. Si l'on avait procédé en juillet par inscription, la chaire serait repourvue.

M. Eternod. n'a pas une opinion très nette dans ce cas spécial. Il a un excellent garant dans la façon dont on s'est exprimé à l'égard de M. Guye. La Fac. des Sc. a fait connaître nettement son opinion. La chaire de phys. intéresse la Fac. de médecine, qui sera heureuse de la voir bien pourvue.

Sur le mode de nomination, M. Eternod estime que les 2 procédés sont défectueux. L'inscription écarte les sommités ; la vocation rend la question trop personnelle.

M. Seitz. Je suis secrétaire du bureau depuis le 15 juillet dernier. Il y a eu, depuis cette date, 3 places de prof. à repourvoir. Je constate que dans les 3 cas, il y a eu vocation. Sans doute cela est parfaitement légal, mais c'est paraître écarter de parti-pris certains concurrents. ~~On peut~~

La Faculté ~~peut~~ et l'Université peuvent toujours combattre énergiquement les candidatures qui ne leur paraissent pas bonnes pour l'enseignement. Il votera donc contre la vocation, et non contre M. Guye.

M. Sarasin désire qu'il sorte un vote unanime en faveur de M. Guye. Il a voulu seulement faire ses réserves de principe. Il propose que l'unanimité se prononce en sa faveur, avec réserves de principes pour quelques-uns.

M. Duparc se réserve de discuter la question de l'appel quand le moment sera venu. Aujourd'hui, si nous estimons M. Guye capabl, il faut ~~dire~~ répondre oui.

M. Chodat. M. le Président n'a pas agi en autocrate, mais en chef conscient de la situation. Dans son esprit, la vocation de nationaux n'est point nécessairement

la règle. Entrer dans certains détails serait ici superflu. Cette décision d'un appel n'était pas arrêter d'avance. Le président voulait d'abord charger M. Guye d'un remplacement d'un an. M. Chodat a d'abord été d'accord, puis on a reconnu des inconvénients, et le Dép^t a trouvé, dans ces circonstances, l'appel préférable.

M. Alf. Martin. On nous pose la question de savoir s'il y a lieu d'appeler sans inscription. Si nous ne pouvons répondre s'il y a lieu ou non, nous n'avons rien à faire.

M. Ern. Martin s'incline devant le jugement des gens compétents, et se joint entièrement aux réserves de M. Sarasin.

M. le Recteur met aux vois la proposition du Dép^t

8 oui, 2 non

Lettre de Guye à Favon, le 14 novembre 1900

La nomination de Guye à la chaire de physique date du 10 novembre. Quatre jours plus tard, Guye écrit au Conseiller d'État.

Genève, le 14 novembre 1900.

Monsieur G. Favon. Président du Conseil d'Etat. Genève.

Monsieur le Président,

J'ai l'honneur de vous accuser réception de votre lettre datée du 10 novembre, m'annonçant ma nomination à la chaire de Physique à l'Université de Genève.

En vous exprimant tous mes remerciements pour la confiance dont le Conseil d'Etat a bien voulu m'honorer, il me tient à cœur de vous dire que toute mon activité et tous mes efforts tendront à la mériter et que le Département de l'Instruction Publique peut compter sur mon entier dévouement.

Veuillez bien, Monsieur le Président, agréer l'expression de ma considération très respectueuse.

C.E. Guye

B.3 Guye et son laboratoire : demandes de financement

Ces deux lettres manuscrites se trouvent aux archives du DIP, dans le carton 1985 va 5.3.26 Université 7. Elles ne sont pas numérotées.

Lettre de Guye à Favon, le 18 avril 1902

Une année et demi après son arrivée à Genève, Guye manque de moyens pour mener à bien le développement de son laboratoire. Il rappelle au Conseiller d'état Favon qu'il avait été promis 10 000 francs à Curie, qui n'ont jamais été versé.

> Genève, le 18 avril 1902
>
> Monsieur le Conseiller d'Etat. G. Favon.
>
> Président du Département de l'Instruction Publique. Genève.
>
> Monsieur le Président
>
> Permettez-moi de vous communiquer quelques renseignements sur la situation actuelle du Laboratoire de Physique de l'Université.
>
> Depuis la réorganisation des travaux pratiques, le nombre des étudiants qui suivent les laboratoires a considérablement augmenté ; de 18 qu'il était au semestre d'hiver 1900-1901, il s'est élevé à 57 au semestre d'hiver 1901-1902. En outre, une dizaine d'étudiants suivent le laboratoire du 2^n degré ou se livrent à des travaux de recherches.
>
> En présence de cette augmentation, j'ai dû compléter les aménagements et installations électriques pour l'acquisition d'une machine haute fréquence, devant fournir le courant à tous les laboratoires. Le montant de cette acquisition y compris la pose d'une ligne s'élève à fr. 2004.80.
>
> En outre, pour parer aux besoins les plus pressants j'ai dû faire construire dans le laboratoire même ou acheter aux constructeurs les appareils et les instruments les plus indispensables. Ces acquisitions étaient d'autant plus urgentes que le crédit (de 10000 frs si je ne me trompe, dont il avait été question lors de la nomination de M. Curie) n'a pas été maintenu et que d'autre part M. le prof. Rilliet renonçant à s'occuper des laboratoires, tous les instruments qui étaient sa propriété personnelle ont été retirés de ce fait.
>
> Dans ces circonstances, je viens vous prier de bien vouloir examiner s'il ne serait pas possible d'affecter sur le boni qui (d'après les explications qu'a bien voulu me fournir M. le Secrétaire) aurait été réalisé précisément sur le compte des aménagements des nouveaux locaux de l'Université, une somme de fr. 6500 destinée à couvrir ces dépenses et à compléter les installations du Laboratoire de physique.

Cette mesure me paraîtrait d'autant plus opportune que les charges ordinaires du laboratoire se sont considérablement accrues du fait de l'augmentation du nombre des étudiants.

Dans l'espoir que vous voudrez bien examiner et accueillir favorablement ma demande, je vous prie, Monsieur le Président, d'agréer l'expression de ma considération distinguée.

C. E. Guye

Par la même occasion, je me permets de vous informer que j'ai pris des renseignements sur l'état de santé de M. Hüttenlocker, aide préparateur dont le congé expirait au 31 Mars dernier. M. le Docteur Fontanol estime que M. Hüttenlocker ne pourra jamais reprendre un servie quelque peu pénible (Comme c'est actuellement le cas du service du laboratoire de physique). Il y aurait donc lieu d'examiner quelle situation pourrait lui être faite, mais en attendant et dans l'intérêt du laboratoire, je vous serais très reconnaissant de bien vouloir maintenir son remplaçant, M. Matras, jusqu'au moment où une décision pourrait être prise à cet égard.

Lettre de Guye à Vincent, le 4 novembre 1902

Suite au décès de Favon, et comme sa demande n'avait pas trouvé de réponse, Guye écrit au nouveau Conseiller.

Genève, le 4 novembre 1902

Monsieur le Conseiller d'Etat. Vincent.

Président du Département de l'Instruction Publique. Genève.

Monsieur le Président

Ainsi que M. le Secrétaire du Département vous en aura sans doute informé, j'avais au mois d'avril dernier, fait auprès de M. le Conseiller d'Etat Favon, quelques démarches pour lui demander de bien vouloir examiner la possibilité d'affecter aux laboratoires de physique de l'Université le boni de dix mille francs qui avait été réalisé sur les aménagements et installations de ces laboratoires. Ces démarches qui, par suite de l'état de santé de Monsieur Favon ne purent être poussées activement n'aboutirent pas.

Par sa communication du 26 écoulé, M. le Secrétaire du Département me fait savoir que vous voulez bien consentir à examiner à nouveau cette question ; permettez moi donc de vous en exprimer d'abord ma très vive reconnaissance et de vous exposer la situation actuelle du laboratoire de physique.

Lors de sa nomination, M. le prof. Curie avait demandé un crédit extraordinaire de fr. dix mille, destiné à l'acquisition d'instruments. La nécessité de compléter la collection des instruments de mesures électriques avait déjà alors été reconnue

et l'on ne peut que regretter à ce point de vue que ce crédit n'ait pas été maintenu lors de la démission de Monsieur Curie.

En outre, il n'est pas inutile de rappeler que M. le prof. Ch. Soret, mon prédécesseur, s'occupait plus particulièrement d'optique. Les acquisitions en instruments étaient donc tout naturellement faites plutôt dans cette direction et ce mode de faire était d'autant plus justifié que M. le prof. Rilliet, ami personnel de M. Soret mettait à sa disposition sa collection d'instruments de mesures électriques, d'une valeur de 18000 à 20000 francs.

Aujourd'hui cette situation a cessé de sorte que le laboratoire de physique se trouve actuellement très pauvre en appareils et instruments d'électricité.

Pour parer, dans la mesure du possible à cet état de choses, sans augmenter outre mesure les dépenses, j'ai fait construire dans le modeste atelier de mécanique dont dispose le laboratoire, un certain nombre d'appareils courants (commutateurs, rhéostats, etc ne nécessitant pas une grande perfection de construction) le tout représentant approximativement une valeur de deux mille francs. En outre, j'ai avancé une somme de quatre mille francs environ pour acquérir au fur et à mesure des besoins, les appareils et instruments les plus indispensables, dans lesquels il m'aurait été absolument impossible de faire face à ma nouvelle situation.

Je dois ajouter qu'en même temps que j'avais à souffrir de la pénurie des instruments, je voyais le nombre des étudiants qui suivent les laboratoires augmenter considérablement. Pendant l'année qui vient de s'écouler ce nombre a plus que doublé par rapport à ce qu'il était lorsque je suis entré en fonctions et tous mes locaux sont actuellement occupés.

Dans ces circonstances, il serait extrêmement utile et nécessaire, que le boni réalisé antérieurement sur les laboratoires de physique pût leur être affecté.

En vous remerciant très vivement d'avoir bien voulu examiner à nouveau cette question, je vous prie, Monsieur le Président, d'agréer l'expression de ma haute et respectueuse considération.

C. E. Guye

B.4 Lettres écrites par Einstein à Guye

Un certain nombre de lettres écrites par Einstein à Guye ont été publiées dans les *Collected papers of Albert Einstein.* Quelques unes sont pour l'heure encore inédites. Elles sont conservées au Musée d'Histoire des sciences de Genève sous la cote Z281/1.

Lettre du 01 juin 1909. Lettre n^o 1

Einstein répond à Guye suite à l'invitation à venir recevoir son diplôme de docteur *honoris causa* de l'Université de Genève.

> Bern 1. VI. 09.
>
> Aegertenstrasse 53
>
> Hoch geehrter Herr Professor !
>
> Wer könnte einen solchen Aufwand von Freundlichkeit widerstehen ? Ich jedenfalls nicht ; also werde ich kommen. Was ist so ein ungeschickter Kerl wie ich gegen einen von Euch Franzosen ? Man kommt sich vor wie ein Wilder, der einem mit modernen Waffen ausgerüsteten Europaeer begegnet. In Erkenntnis dieser Sachlage versuche ich es nicht, inbezug auf Höflichkeit mit Ihnen zu konkurrieren. Nur das eine darf ich wohl sagen, dass ich mich mit viel Vergn ?gnen unseres Beisammenseins in Zürich erinnere, wo wir über manches Interessante zusammen sprachen.
>
> Für Ihre Gratulation danke ich Ihnen bestens. Ich werde suchen, mein bestes zu thun, um mich des in mich gesetzen Vertrauens würdig zu erweisen. Es erscheint mir recht schwierig, diese Stelle gut zu versehen.
>
> Endlich möchte ich Sie bitten, mir nicht irgend eine besondere Ehre zu erweisen bei der Frage kommenden Gelegenheit. Es wird mir Freude genug sein, zusammen mit Euch Mitphysikern einige gem ?tliche Stunden zu verbringen.
>
> Es grüsst Sie mit aller Hochachtung
>
> Ihr ergebener
>
> A. Einstein.
>
> P.S. Falls es angezeigt ist, dass ich dem Rektor der Universität mitteile, dass ich komme, bitte ich Sie mich davon per Postkarte zu benachrichtigen.

Lettre du 20 janvier 1910. Lettre n^o 2

Dans cette lettre, Einstein demande à Guye des nouvelles du "si difficile travail" qu'il a entrepris, vraisemblablement celui avec Ratnowsky, alors terminé. Il propose même d'y "participer".

La lettre date du 20 janvier *1909*, celle-ci doit être corrigée. Nous sommes alors effectivement en 1910.

> Zürich, 20.I.10
>
> Hoch geehrter Herr Kollege!
>
> Haben Sie Ihre Absicht, nach Zürich zu kommen augegeben? Sie würden mir eine grosse Freude machen, wenn Sie mich in den Stand setzten, etwas an der von Ihnen unternommen schwierigen Arbeit zu thun, wenn es auch nur die Bestätigung irgend einer Einzelheit beträfe. Ich habe Ihnen nur deswegen so lange nicht bescrieben, weil ich einen Brief von Ihnen erwartete. Ich bitte Sie deshalb sehr, mein Stillschweigen nicht auf Mangel an Interesse zurückzuführen! Es macht mir überhaupt stets die grösste Freude, wenn ich irgend etwas zum Gelingen eines wissenschaftlichen Unternehmens beitragen kann.
>
> Mit aller Hochachtung
>
> Ihr ganz ergebener
>
> A. Einstein

Lettre du 11 octobre 1915. Lettre n^o 3

Einstein écrit à Guye pour lui exprimer ses regrets de ne pas avoir pu se rendre au congrès de la Société helvétique des sciences physique qui se déroulait à Genève. Dans cette lettre, il parle à Guye de ses sentiments face à la guerre qui se déroule en Europe.

> 11. Oktober 15.
>
> Lieber Herr Kollege!
>
> Heute bekam ich Ihnen freundlichen Brief, der mehr als 2 Wochen unterwegs war. Ich muss mich sehr entschuldigen, dass ich es versäumt habe, zu der Versammlung nach Genf zu kommen. Aber meine Scheu vor festlichen Gelegenheiten ist in diesen bitteren Zeiten eine so unüberwindliche, dass ich es nicht habe über mich bringen können, hinzugehen, trotz der lockenden Aussicht, meine alten Freunde wiederzusehen[17]. Die Geschehnisse der letzten anderthalb Jahre bedeuten für einen international fühlenden Menschen, wie ich es bin, einen Zusammenbruch schlimmster Art. Was hätten Leibnitz, Descartes und Hume über diese jämmerliche Generation gesagt, bei welcher die Jagd nach dem öden technischen Fortschritt jedes feinere Gefühl getötet hat! Unaussprechlich traurig ist es, die Ausserungen derjenigen zu hören und zu lesen, die sich für die geistigen Führer der Völker halten. Aber ich tröste mich mit der Meinung, dass die wahrhaft Guten durch Einschüchterung une Ekel zum Schweigen gebracht sind.

17. und trotzdem ich in der Schweiz war.

Herrn Schidlof wünsche ich guten Erfolg. Wenn ich über ihn gefragt wurden sollte, würde ich gerne ein Wort für ihn einlegen. Ich glaube aber dass die Herren in Zürich mit ihren Entschlüssen bereits ziemlich fertig sind.

Hoffend, dass wir uns bald und in besseren Zeiten wiedersehen, verbleibe ich mit herzlichen Grüssen.

Ihr A. Einstein.

Lettre du 4 novembre 1915. Lettre n^o 4

Un mois après avoir la lettre précédente, Einstein récrit à Guye. Dans cette lettre, il semble douter que sa précédente missive soit parvenue à son collègue genevois.

4 XI. 15.

Lieber Herr Kollege !

Da ich öfters schlechte Erfahrungen mit der Bestellung meiner Briefe gemacht habe, une ich nicht möchte , dass Sie glauben, ich hätte die Beantwortung Ihres freundlichen Briefes versäumt, denke ich Ihnen hier nochmals für Ihre Freundlichkeit. Hoffentlich sehen wir uns bald in bessere Zeiten wieder.

Es grüsst Sie bestens

Ihr ganz ergebener

A. Einstein

Lettre du 1er novembre 1916. Lettre n^o 5

Un an plus tard, Einstein envoie des "documents" que Guye lui a demandés au sujet de la théorie de la relativité. Il est au fait des recherches poursuivies à Genève par Guye et Lavanchy, auxquelles il dit s'intéresser.

1.XI. [1916]

Hoch geehrter Herr Kollege.

Ich sende die gewünschten Abhandlungen bis auf die von 1914, welche leider vergriffen ist. Mehr als vollwertiger Ersatz ist Broschüre „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie", welche jüngst bei Joh. Ambr. Barth erschienen ist. Um Ihnen noch meine letzte Abhandlung über der Gegenstand beilegen zu können, welch eben im Druck ist, warte ich noch einige Tage. Am besten ist die Theorie in der Broschüre dargelegt und in der kurzen Notiz, die gerade gedruckt wird.

Die Arbeit der Herren Schidloff une Targonski habe ich erhalten. Sehr interessiere ich mich für Ihre Fortsetzung das seinerzeit mit Ratnowski begonnenen Unternehmens zur Prüfung der speziellen Relativitätstheorie. Nach einer

kurzen, Im Archive erschienenen Notiz über den Gegenstand ist dies eine der wertvollsten Arbeiten auf dem Gebiet.

Indem ich mich sehr darauf freue, Sie und die anderen Kollegen bald einmal in der Schweiz wiedersehen zu dürfen, grüsse ich Sie herzlilch.

Ihr A. Einstein.

Lettre du 3 avril 1920. Lettre n^o 8

Cette lettre est certainement une réponse à la volonté de Guye de faire venir Einstein à Genève pour donner des conférences sur la théorie de la relativité. Einstein regrette de ne pas avoir le temps de s'y rendre rapidement.

Berlin 3. IV. 20.

Lieber Herr Kollege!

Ich weiss noch nicht, wann ich wieder in der Schweiz kommen werde. Der April kommt nicht in Frage, weil ich hier zu thun habe. Im Mai bin ich in Holland, wo ich durch Bemühung[18] von Ehrenfest und H. A. Lorentz eine art „Nebenprofessur" erhalten habe. Im Juni muss ich nach Nowegen. Also werde ich im Sommersemester kaum noch Zeit haben, in die Schweiz zu gehen, zumal ich doch nicht beständig von hier weg sein kann. Auch bedeutet für den „Mitteleuropäer" eine Reise in die Schweiz nichts Kleines, da unser nervus rerum in Romanshorn aufhört. Aber aufgeschoben ist nicht aufgehoben. Bei meiner nächsten Reise in die Schweiz will ich gerne mein Verspechen einlösen.

18. Difficile à lire.

B.5 Lettre de Starke à Guye, le 29 décembre 1922

L'expérimentateur Hermann Starke écrit à Guye le 29 décembre 1922 pour lui demander le *Mémoire* publié en 1921 sur la vérification de la formule de Lorentz-Einstein. Cette lettre manuscrite en français est conservée au Musée d'histoire des sciences de Genève sous la cote Z281/2 Nř5.

> Technische Hochschule, Aachen, 29-12-1922
>
> Bien cher Mr. le professeur,
>
> en même temps que je vous envoie quelques imprimés des travaux scientifiques exécutés l'année passée dans mon institut, je vous prie, Mr. le professeur, de vouloir me permettre la demande empressée d'un exemplaire de votre mémoire sur la vérification de la formule de Lorentz-Einstein que vous avez donnée avec Mrs. Ratnowsky et Lavanchy, d'une façon qui à ce qu'il me semble ne peut pas être surpassée. C'est de mon collègue prof. v. Laue que dans ce moment je me suis preté votre publication intéressante, mais pour une étude approfondie, il serait d'une grande importance pour moi d'en posséder un exemplaire. J'ose vous en demander dans l'espoir que vous êtes encore en possession de quelques uns.
>
> Agréez, monsieur le professeur, l'assurance de mon profond respect.
>
> Dr. H. Starke
>
> prof. ord. en physique

C

Annexe C : Clichés originaux retrouvés au Musée d'histoire des sciences

Voici quelques clichés originaux retrouvés au Musée d'Histoire des sciences de Genève.

Mesure de l'intégrale de champ électrique

Avant de mesurer l'intégrale de champ électrique, Guye et Lavanchy ont cherché à vérifier dans quel intervalle de déviation la méthode des trajectoires *presque* identiques serait valide. Ils ont donc mesuré cette intégrale pour plusieurs valeurs de déviations [fig. C.1].

Il s'agit ensuite de mesurer l'intégrale de champ électrique. Pour cela, seule la déviation électrique du faisceau est utilisée. Nous voyons que la stabilité du faisceau est somme toute assez relative [fig. C.2 et C.3].

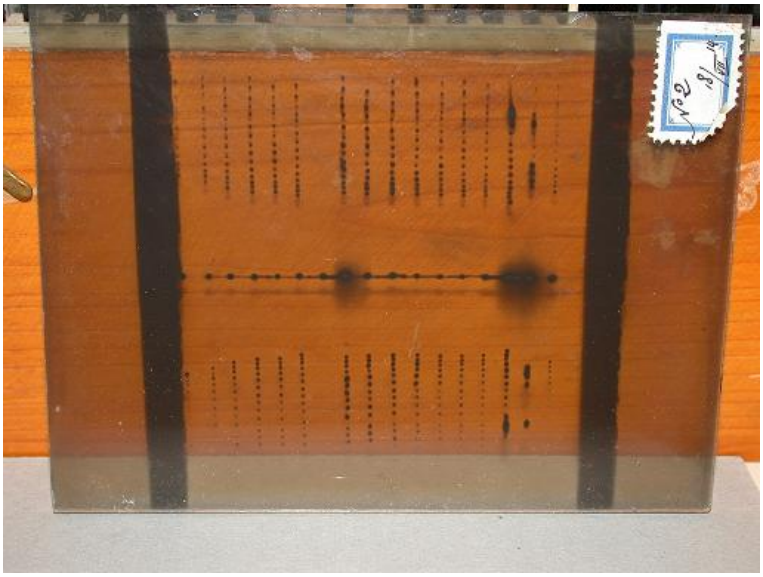

FIGURE C.1 – Etude des variations de l'intégrale de champ. Daté du 18 juillet 1914.

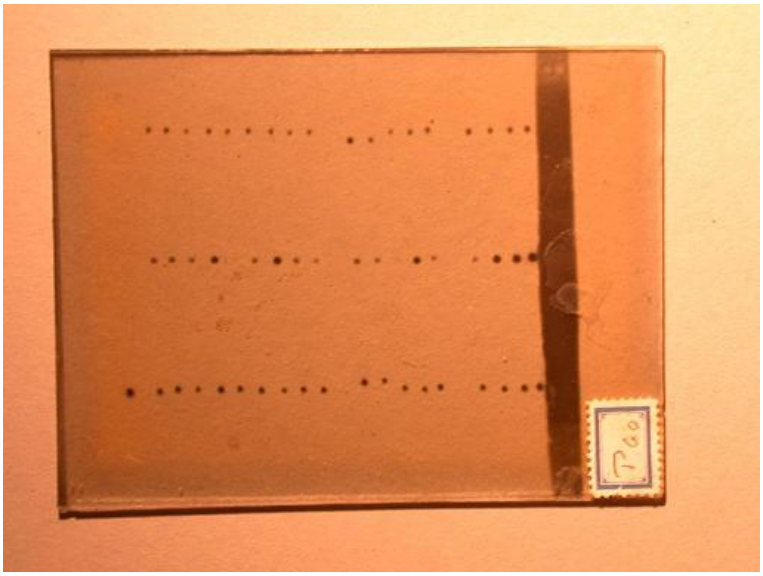

FIGURE C.2 – Mesure de l'intégrale de champ électrique (1).

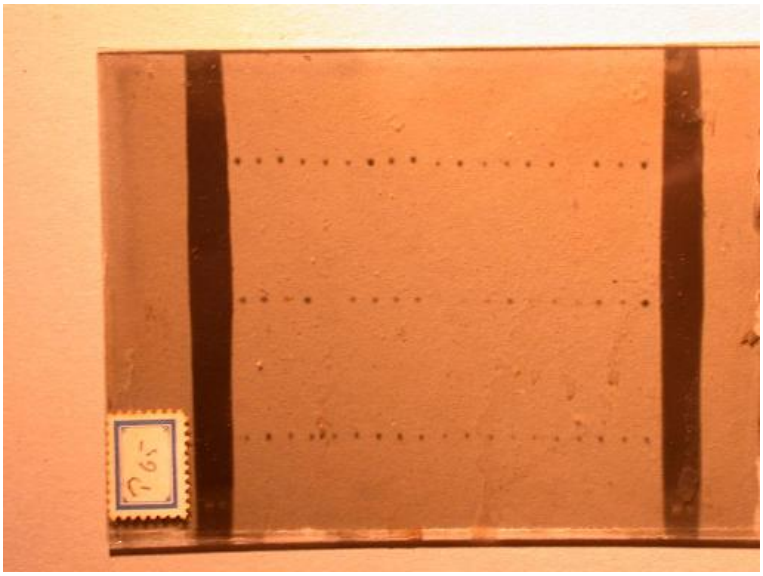

FIGURE C.3 – Mesure de l'intégrale de champ électrique (2).

Rayons de comparaison

Puis, Guye et Lavanchy mesurent les grandeurs de comparaison. Les deux double-déviations sont visibles sur les plaques photographiques. Les mesures sont effectuées par série de 4 double-déviations [C.4]. Parfois, la stabilité n'est pas rigoureusement assurée [fig. C.5]. D'autres fois, ils ne parviennent pas à réaliser 4 double-déviations mais seulement 3 [fig. C.6].

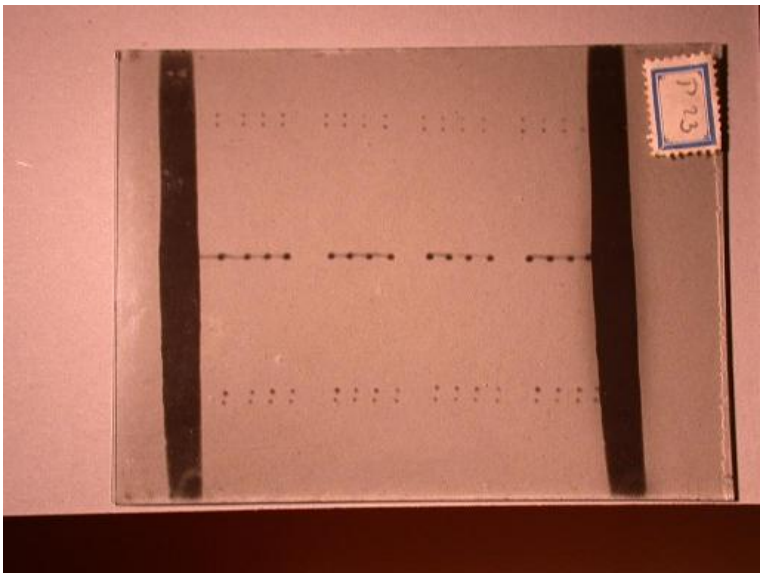

FIGURE C.4 – Mesure des grandeurs de comparaison.

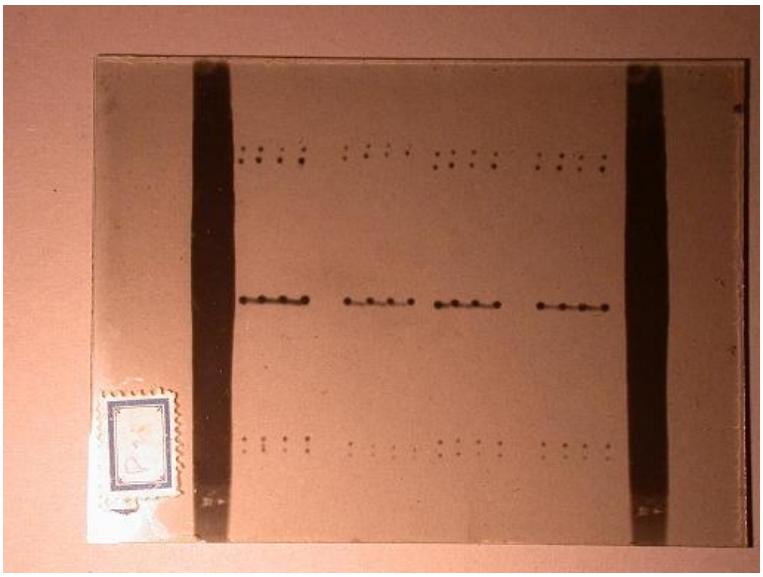

FIGURE C.5 – Mesure des grandeurs de comparaison dans laquelle le faisceau ne s'est pas maintenu rigoureusement stable.

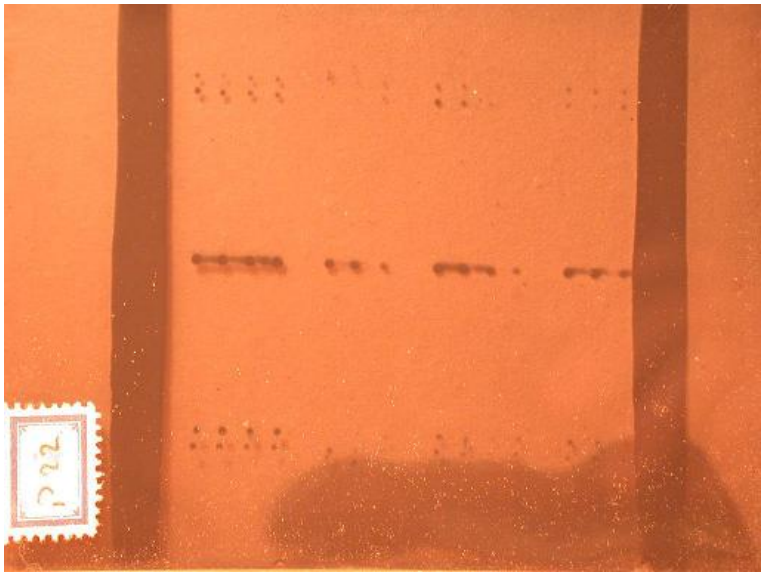

FIGURE C.6 – Mesure des grandeurs de comparaison dans laquelle Guye et Lavanchy ne parviennent pas à effectuer 4 séries de double-déviations.

Déterminations

Nous ne possédons pas les 150 clichés à partir desquels Guye et Lavanchy construisent le tableau publié dans le *Mémoire* de 1921. Ceux que nous avons retrouvé permettent néanmoins de voir la difficulté à obtenir une émission stable [fig. C.7]. Ceux-ci montrent également que certains clichés [fig. C.11] ont été exclu du traitement des mesures alors qu'ils paraissent meilleurs que d'autres qui ont eux été retenus. Quelles sont les raisons de ces choix ? Une étude plus poussée des clichés permettrait de le dire. Nous pouvons éventuellement supposer que la difficulté s'est posée du point de vue des mesures électriques à ce moment là.

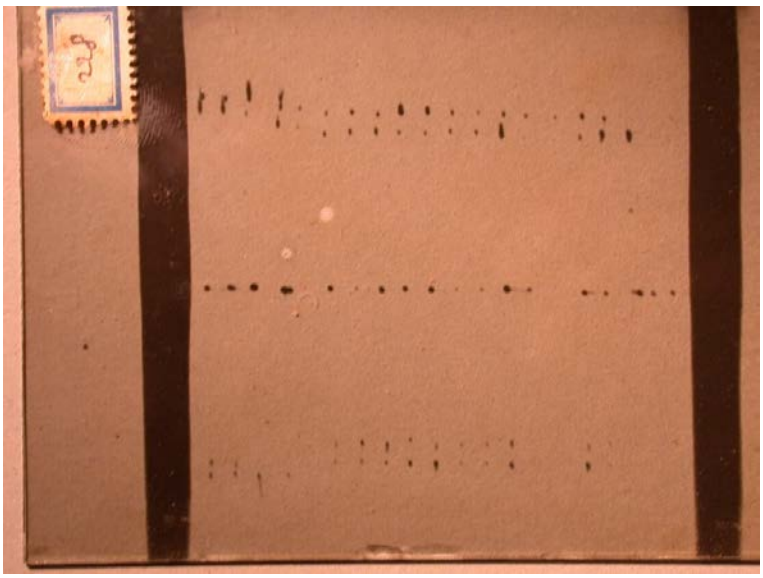

FIGURE C.7 – Plaque n^o 228 retenue par Guye et Lavanchy. $\beta = 0{,}4723$. Nous voyons la stabilité très relative de l'émission.

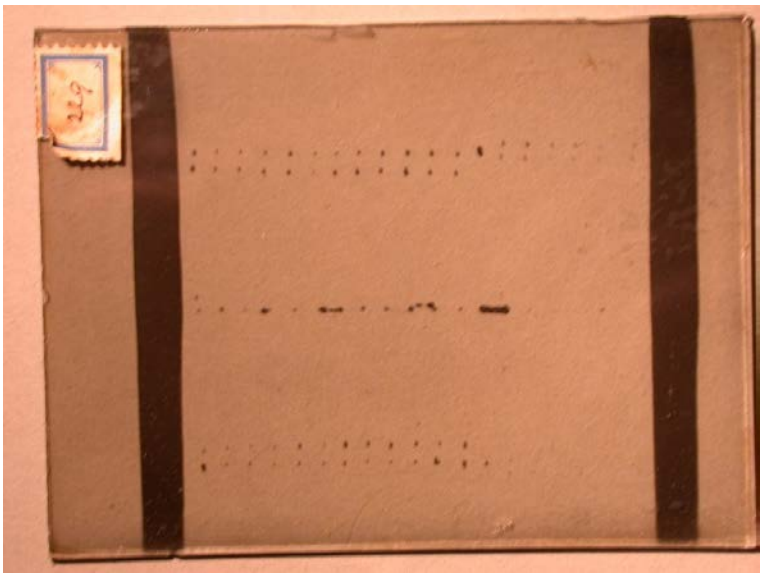

FIGURE C.8 – Plaque n^o 229 retenue par Guye et Lavanchy. $\beta = 0{,}4903$. Il s'agit du cliché effectué, aux erreurs de mesure près, sur les rayons les plus rapides. Nous voyons qu'après 12 déterminations, les rayons ne sont plus émis à la même vitesse.

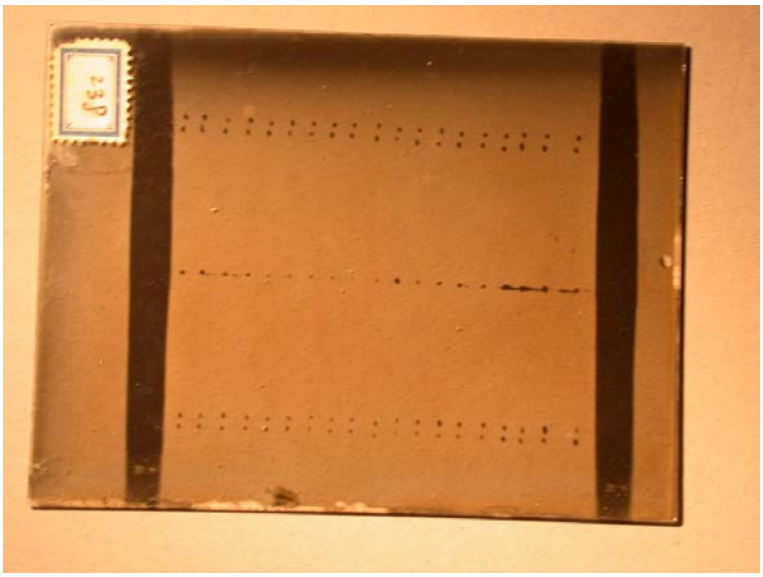

FIGURE C.9 – Très bonne série de déterminations. Plaque n^o 238 retenue par Guye et Lavanchy. $\beta = 0{,}4636$.

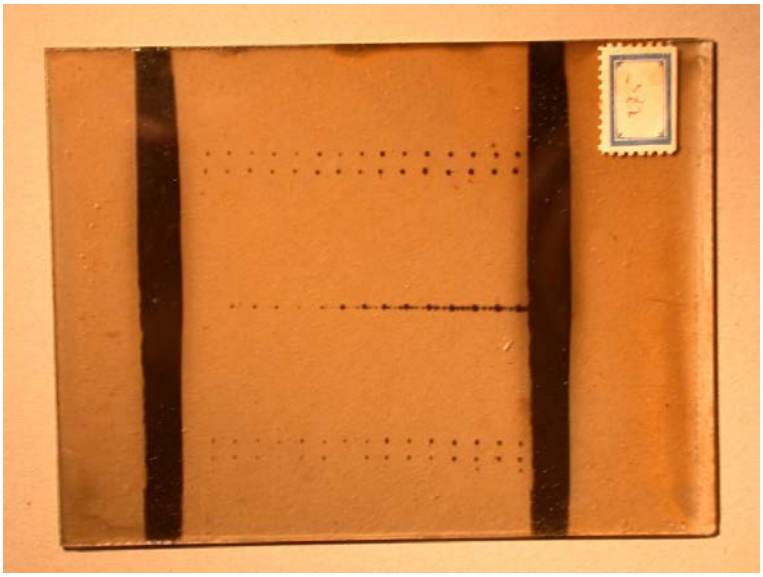

FIGURE C.10 – Une autre très bonne série de déterminations. Plaque n^o 275 retenue par Guye et Lavanchy. $\beta = 0{,}4097$.

FIGURE C.11 – Plaque n^o 247 non-retenue par Guye et Lavanchy malgré la très bonne stabilité du faisceau.

D

Annexe D : Réalisation d'un programme de calcul de l'intégrale de champ électrique dans le tube reconstruit

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>


/*-------------------------------------------------------------------------*/
/*-----   Calcul du potentiel électrostatique dans le tube de déviation  -----*/
/*-----                              Yacin KARIM                          -----*/
/*-----                                   ou                              -----*/
/*----- Résolution de l'équation de Laplace par la méthode de relaxation -----*/
/*-------------------------------------------------------------------------*/

/*-------------------------------------------------------------------------*/
/*-----                    Principe général                               -----*/
```

```
/*-----     Après avoir défini les conditions aux limites données par    -----*/
/*-----   la géométrie et les potentiels utilisés, le programme calcule  -----*/
/*-----   le champ électrostatique en tout point à l'intérieur du tube   ---- */
/*-----   par la méthode de relaxation (Voir Principe de la méthode)     -----*/
/*-------------------------------------------------------------------------*/


/*Programme principal*/

main()

{
/*Déclaration des variables utilisées par le programme principal*/

/*Les plateaux de déviation électrique*/
int x,y,z,ni,N ;             /*Dimensions du tube (Parallélépipède rectangle)*/
 : longueur selon l'axe; y : verticale; z: profondeur*/

double V0 ;                        /*Le potentiel appliqué au plateau du haut*/
double V1 ;                        /*Le potentiel appliqué au plateau du bas */

/*Variables définissant le noeud*/
int i,j,k,l,n,o,q,NN,ii,jj,ynoeudn,xnoeudn ;

/*Potentiel de l'anode, et
    donc potentiel auquel est porté l'écran électrostatique*/

    double Va, oui, L ;

double b,a,r,c,d,arrond,Yh,Yb,m,v0,qe,dt,y0,x0,yn,betasurc,cl,duree,xx1,Aval,yynn;
double racine, m1, m2, Aval2 ;    /*Précision et valeur du pas spatial*/

double espace[320][660], espacedx[320][660], champx[320][660], champy[320][660],
                              yy[10000], xx[10000], aa[10000], amoy[10000], s[10000];
double A[10000], mat_champ[10000][2];
int xnoeud[10000], ynoeud[10000] ;
```

```
/*Interface Utilisateur.....*/
/*le programme demande à l'utilisateur de rentrer les données
    dont il se servira pendant l'execution*/

printf("Bonjour,le but de ce programme est de résoudre l'equation de Laplace 2D
             par la méthode de relaxation.\n");
printf("\n");
printf("C'est a dire que l'on va discrétiser l'espace à trois dimensions et
            calculer les valeurs du potentiel en tout point (i,j,k).\n");
printf("\n");
printf("Après avoir défini les conditions aux limites, le programme calculera
            le potentiel en (i,j,k) par moyennage sur les 6 noeuds les plus proches,
printf("Pour cela,vous devez entrer différentes valeurs permettant de définir
            la géométrie du tube, des plateaux, et les valeurs des potentiels de
            l'écran et des plateaux.\n");
printf("\n");
printf("Nous ferons l'approximation suivante : le tube est un parallélépipède
            rectangle.\n");
printf("\n");
printf("Choisissez le potentiel appliqué au plateau du haut; V0 = ");
scanf("%lf",&V0);
printf("Choisissez le potentiel appliqué au plateau du bas; V1 = ");
scanf("%lf",&V1);
printf("Choisissez le potentiel appliqué a l'ecran; Va = ");
scanf("%lf",&Va);
printf("Choisissez tout d'abord la précision r= ");
scanf("%lf",&r);
printf("Choisissez le nombre d'itérations N. \n");
printf("N= ");
scanf("%d",&N);
printf("Choisissez la longueur du tube en metre \n");
printf("L= ");
scanf("%lf",&L);
```

```
x=L*2000;/*Nb colonnes*/
y=320;/*Nb lignes*/

/*z=80;*/
for(i=0;i<=x-1;i++)
{for(j=0;j<=y-1;j++) /*On met les tableaux à 0 partout et aux potentiels
                                        qu'il faut sur les plateaux*/
espace[j][i]=0;
espacedx[j][i]=0;
/*delta[j][i]=0;*/
}
for(j=0;j<=x-1;j++)

{espace[0][j]=Va;
espace[y-1][j]=Va;
espacedx[0][j]=Va;
espacedx[y-1][j]=Va;}

for(i=0;i<=y-1;i++)

{espace[i][0]=Va;
espace[i][x-1]=Va;
espacedx[i][0]=Va;
espacedx[i][x-1]=Va;}



for(o=0;o<=N;o++)
    {

/*je construis le tableau espacedx et delta (avec des 0 et des 1)*/

for(i=1;i<=y-2;i++)
for(j=1;j<=x-2;j++)
{
```

```
espacedx[i][j]=(espace[i+1][j]+espace[i-1][j]+espace[i][j+1]+espace[i][j-1])/4;

}
for(i=1;i<=y-2;i++)
for(j=1;j<=x-2;j++)
{
espace[i][j]=espacedx[i][j];
}
for (j=40;j<=140;j++)
for(i=168;i<=178;i++)
{ Yh=2*(0.0005*j*j-0.04*j+84.8);
arrond=Yh-i;
if(arrond<0) {arrond=-arrond;}
else{arrond=arrond;}
if(arrond<0.5) {espace[i+1][j]=V0;espace[i][j]=V0;}
else{}
}
for (j=40;j<=140;j++)
for (i=142;i<=152;i++)
{ Yb=2*(-0.0005*j*j+0.04*j+75.2);
arrond=i-Yb;
if(arrond<0) {arrond=-arrond;}
else{arrond=arrond;}
if(arrond<0.5) {espace[i][j]=V1;espace[i-1][j]=V1;}
else{}
}
}



    printf("a= %f \n",a);
    printf("b= %f \n",b);
    printf("%f \n",espace[76][40]);
FILE *fichier, *fichier2;

fichier=fopen("resultats3.txt","w");
```

```
/*fichier2=fopen("resultats4.txt","w");*/

for (i=0;i<=y-1;i++)
for (j=0;j<=x-1;j++)
{
fprintf(fichier,"%d      %d      %lf \n",j,i,espace[i][j]);
/*fprintf(fichier2,"%f \n",delta[i][j]);*/
}

fclose(fichier);
/*fclose(fichier2);*/

    /*Calcul du champ*/

for (i=0;i<=y-2;i++)
for (j=0;j<=x-2;j++)
{ champx[i][j]=(espace[i][j]-espace[i][j+1])*10000/5;
champy[i][j]=(espace[i][j]-espace[i+1][j])*20000/5;
champx[i][x-1]=0;
champy[y-1][j]=0;
}

    /*on le met dans un fichier 'champ'*/

FILE *fichier3;

fichier3=fopen("champ.txt","w");

for (i=0;i<=y-1;i++)
for (j=0;j<=x-1;j++)
{
fprintf(fichier3,"%d      %d      %f      %f \n",j,i,champx[i][j],champy[i][j]);

}

fclose(fichier3);
```

```
    /*On calcule l'intégrale Int{Int{Grad(V)}dXdU}/V*/


    /*On calcule la trajectoire*/

/*on initialise tout les x, y, xnoeud, ynoeud à 0*/
oui=1;
while(oui=1)
{
for(i=0;i<=9999;i++)
{ xx[i]=0;
yy[i]=0;
xnoeud[i]=0;
ynoeud[i]=0;
}

/*On défini les constantes*/

m=9.109e-31;          /*masse de l'électron en kg*/
qe=-1.602e-19;         /*charge de l'électron en Coulombs*/
cl=299792458;           /*vitesse de la lumière en m/s*/
printf("On va maintenant calculer la trajectoire du faisceau
            et l'integrale de champ electrique. \n");
printf("La masse de l'electron vaut m= %e" ,m);
printf("La charge de l'electron vaut e= %e" ,qe);
printf("Choisissez la vitesse du faisceau v0, en unite de vitesse
            de la lumiere. \n Ex: tout reel de 0 à 1 non compris
            (autrement dit, en Beta) \n");
printf("v0= ");
scanf("%lf",&v0);
v0=v0*cl;
printf("v0= %e m/s \n" ,v0);
dt=1e-12;
printf("Le pas temporel utilisé dans les calculs est dt= %e s\n" ,dt);
```

```
duree= L/v0/dt;
NN=Arrondit(duree);
printf("La durée du trajet est T= %lf fs \n" ,duree);
printf("Arrondi cela nous donne NN= %d \n" ,NN);
xx1=v0*dt;
xx[0]=0;
yy[0]=0;
xx[1]=xx1;

printf(" %e \n",xx1);
yy[1]=0;  /*tangente horizontale*/
betasurc=0;
betasurc=1-v0*v0/cl/cl;
printf("(beta/c)2 = %lf \n", betasurc);
racine = sqrt(betasurc);
printf("racine(1-Beta2) = %f \n", racine);

mat_champ[0][0]=0;
mat_champ[0][1]=0;
mat_champ[1][0]=0;
mat_champ[1][1]=0;

for(n=2;n<=NN;n++)
{ xx[n]=n*xx1;
xnoeud[n]=Arrondit(10000*xx[n]/5);
yn=160+yy[n-1]*4000; /*Position en noeud, à arrondir ensuite*/
ii=Arrondit(yn);
jj=xnoeud[n-1];
yy[n]=qe*dt*dt/m*racine*champy[ii][jj]+2*yy[n-1]-yy[n-2];
m1=champx[ii][jj];
m2=champy[ii][jj];
mat_champ[n][0]=m1;
mat_champ[n][1]=m2;
}
printf("%f \n",xx[3]);
FILE *fichier4, *fichier6;
```

```
fichier4=fopen("trajectoire.txt","w");
fichier6=fopen("matchamp.txt","w");
for (n=0;n<=NN;n++)

{
fprintf(fichier4,"%e      %e \n",xx[n],yy[n]);
fprintf(fichier6,"%f      %f \n",mat_champ[n][0],mat_champ[n][1]);
}

fclose(fichier4);
fclose(fichier6);

/*Calcul de l'intégrale de champ*/

for(n=0;n<=NN;n++)
{
ynoeud[n]=Arrondit(yy[n]*20000/5);
ynoeudn=ynoeud[n]+160;
xnoeudn=xnoeud[n];
aa[n]=champy[ynoeudn][xnoeudn];}
amoy[0]=champy[160][0];
s[0]=aa[0];
A[0]=2*s[0]/(V0-V1)*L*L/NN/NN*1000;


for(n=1;n<=NN;n++)
{
amoy[n]=(aa[n]+aa[n-1])/2;
s[n]=s[n-1]+(NN-n)*amoy[n];
A[n]=2*s[n]/(V0-V1)*L*L/NN/NN*1000;
}
Aval=A[NN];
yynn=yy[NN]*1000*2;
printf("L'integrale de champ, par le calcul en faisant l'hypothèse
            que seul Ey, vaut A = %e \n",Aval);
```

```
printf("La déviation électrique vaut x= = %f \n",yynn);
Aval2=1/(V0-V1)/1.77e11*yynn*cl*cl*2*(1/sqrt(1-v0*v0/cl/cl)-1);
printf("L'integrale de champ, calculée comme mesurée, vaut A = %e \n",Aval2);
    FILE *fichier5;

fichier5=fopen("integrale.txt","w");

for (n=0;n<=NN;n++)

{
fprintf(fichier5,"%e  \n",A[n]);
}

fclose(fichier5);
printf("on continue ? si oui tapez 1, sinon tapez 0 \n");

scanf("%lf",&oui);

}

    /*Le main est fini*/
}

    /*Nouvelle fonction pour calculer les arrondis*/
    Arrondit(double T)
{
double arrondi;

if (0<=T)
   {
arrondi=floor(T+0.5);


   }
    else
   {
```

```
       arrondi=ceil(T-0.5);

   }
return (arrondi);
}
```

Vers une vérification expérimentale de la théorie de la relativité restreinte
Réplication des expériences de Charles-Eugène Guye (1907-1921)

Résumé

Nous nous intéressons dans cette thèse à un aspect assez peu documenté de l'histoire de la théorie de la relativité restreinte, la recherche d'une vérification expérimentale de ses prédictions sur la variation de l'inertie en fonction de leur vitesse. Nous complétons les études historiques antérieures sur les expériences de Kaufmann (1906) et de Bucherer (1908), et montrons que la vérification de la formule de Lorentz-Einstein constitue encore un enjeu expérimental après 1911. Nous étudions plus particulièrement les recherches dirigées par Charles-Eugène Guye en collaboration avec ses étudiants Simon Ratnowsky (1907-1910) et Charles Lavanchy (1913-1915). Nous montrons que la seconde phase de ce travail est très largement considérée dans les années 1920 comme la vérification expérimentale la plus précise de la formule de Lorentz-Einstein. Nous utilisons la méthode de réplication, appliquée à l'expérience de Guye et Lavanchy. La très grande maîtrise de l'émission cathodique, associée à une méthode d'investigation spécifique, leur permet de surmonter toutes les difficultés identifiées alors comme préjudiciables au succès de ce type d'expérience.

Mots clés : expérience de Guye et Lavanchy ; théories de l'électron ; théorie de la relativité restreinte ; formule de Lorentz-Einstein ; formule d'Abraham ; Charles-Eugène Guye ; méthode de réplication ; rayons cathodiques ; émission cathodique.

Abstract We focus on an aspect of the history of special relativity theory that has not received much attention yet, namely the search for an experimental verification of the relativistic velocity dependency of inertia. Former historical studies on Kaufmann's 1906 and Bucherer's 1908 experiments are pursued. It is shown that verifying Lorentz-Einstein's formula is still a challenge after 1911. We concentrate here on Charles-Eugène Guye's works with students Simon Ratnowsky (1907-1910) and Charles Lavanchy (1913-1915). The second experiment is shown to be considered as the most precise verification of Lorentz-Einstein's formula by a large number of 1920s physicists. The replication method is used to probe Guye and Lavanchy's experiment. They are able to solve every then known difficulty in successfully performing such an experiment, through a great mastership of the crucial issue of cathode ray emission, together with a specific investigation method.

Keywords : Guye and Lavanchy's experiment ; electron theories ; special relativity theory ; Lorentz-Einstein's formula ; Abraham's formula ; Charles-Eugène Guye ; replication method ; cathode rays ; cathode ray emission.