



Jérémy Auer
Eric Baudon
Isabelle Gile
Barbara Peel
Valérie Seguin

Commanditaire : Christine Blondel
Tuteurs scientifiques : Philippe Auriol
Sarah Carvalho
Laurent Krähenbühl
Conseiller en communication : Nicolas Hourcade
Conseiller en gestion de projet : Cécile Nougier

Département d'accueil : EEA/CLES
Date du rapport : 9 juin 2005

Rapport

Projet Ampère



Remerciements :

Au fil de notre projet, de nombreuses personnes nous ont fourni une aide précieuse, et ce rapport est donc pour nous l'occasion de les remercier une fois encore. Nous tenons ainsi bien sûr à remercier nos tuteurs, Philippe Auriol, Sarah Carvallo et Laurent Krähenbühl, qui nous ont guidés et orientés tout au long de ce projet, tout comme Nicolas Hourcade et Cécile Nouguier qui nous ont apporté de nombreux conseils concernant respectivement la communication et la gestion de projet. Nous souhaitons également remercier nos commanditaires, Christine Blondel et Stéphane Pouyllau, qui nous ont accordé beaucoup de confiance pour ce projet, nous espérons que notre travail les satisfera. Nous associons aussi bien sûr à ces remerciements Paulo Brenni que nous a fourni de nombreuses pistes notamment pour la réalisation de notre site Web, Michel Siméon, qui nous a accordé beaucoup de son temps et qui nous a fait partager sa passion pour Ampère et l'électromagnétisme, tout comme Michel Dürr, avec qui nous avons visité le musée Ampère. Enfin, nous remercions les techniciens de l'Ecole Centrale, qui avec beaucoup de gentillesse ont pris sur leur temps pour nous aider dans la réplique de l'expérience. Nous tenons ainsi à remercier Jean-Marc Sanchez, le menuisier, qui nous a accordé une après-midi pour la découpe du bois, Francis Chappuis, Serge Germiano et Jacques Gonin, les trois techniciens du H9, qui nous ont apporté toute leur expérience et sans qui il aurait été impossible de réaliser la réplique, ainsi que Daniel Prebet pour son aide lors de la réalisation de l'aimant.

Résumé :

André Marie Ampère (1775-1836), savant français du XIX^{ème} siècle, a beaucoup contribué à l'évolution de la science de son époque, en particulier de l'électromagnétisme. En hommage à ses travaux a été lancé à la Cité des Sciences et de l'Industrie un projet visant à réaliser un site Web consacré à son œuvre. Ce site donnera notamment accès à l'ensemble de ses publications ainsi qu'à un musée virtuel.

Le projet Ampère mené sur un an et demi à l'Ecole Centrale de Lyon avait pour objectif de présenter sur le site Ampère la réplique et la simulation d'une expérience réalisée à deux reprises par Ampère, en 1821 et 1822: l'expérience sur les « courants d'influence ».

Cette expérience a permis à Ampère d'entrevoir le phénomène d'induction sans toutefois parvenir à complètement l'interpréter. Cette expérience est donc très intéressante du point de vue de l'histoire des sciences, d'autant plus qu'Ampère en a laissé peu de traces et ainsi les différentes répliques qui en ont déjà été réalisées n'ont pas toutes interprété l'expérience de la même manière.

Une étude bibliographique ainsi que la nouvelle réplique accompagnée de la simulation nous ont permis de mieux comprendre ce qui s'est passé et de proposer une interprétation de l'expérience mais aussi de mettre en lumière la difficulté du travail de l'historien des sciences.

Abstract :

French scientist André-Marie Ampère (1775-1836) played a significant part in the scientific advances of the 19th century, especially in the field of electromagnetism. As a tribute to him, the Cité des Sciences et de l'Industrie launched a project designed to build a website dedicated to his work. This website will, among other things, enable visitors to access all his publications as well as a virtual museum.

The main purpose of the Ampère Project, which had been studied at the Ecole Centrale de Lyon for a period of a year and a half, was to use the website to present an experiment that Ampère carried out twice, in 1821 and in 1822: the experiment on induced currents. The website should focus on how the experiment was replicated and simulated by computer.

Although this experiment allowed Ampère to get a glimpse of the induction phenomenon, he failed to interpret it so as to actually discover induction. Therefore, this experiment is very interesting from a History of Science standpoint, all the more since Ampère did not leave a thorough record of it. As a result, the replications that have already been made display a rather wide range of interpretations of Ampère's experiment.

Bibliographical studies, as well as a new replication supported by a simulation, have provided a better understanding of what actually happened and emphasized the difficulties of a science historian's work.

Introduction:

Le projet d'études « Ampère », situé à la croisée des chemins entre électrotechnique et histoire des sciences s'est inscrit dans le cadre d'un projet plus vaste conduit par des chercheurs et des informaticiens travaillant à la Cité des Sciences et de l'Industrie, notamment Christine Blondel, chercheuse CNRS, qui est la commanditaire du projet à l'Ecole Centrale. Le projet global se fait en lien avec une Action Concertée Incitative du Ministère (ACI). Il a pour objectif de réaliser un site Web consacré à la vie et à l'œuvre du scientifique André-Marie Ampère.

Ce site Web doit d'une part donner accès à l'ensemble des œuvres publiées d'Ampère, à certains de ses manuscrits et à une partie de sa correspondance. Ces œuvres sont en effet pour le moment très dispersées ; le site Ampère devrait les rendre accessibles à toute personne amenée à s'intéresser à Ampère. D'autre part, le site doit également proposer un laboratoire historique ouvert à des répliques d'expériences de l'époque ainsi qu'un espace pédagogique présentant des projets liés à Ampère et l'électromagnétisme. Sa finalité est ainsi d'offrir à la fois une base de données de référence pour les chercheurs et les historiens des sciences s'intéressant à Ampère et de contribuer à l'enseignement et à la diffusion de l'histoire des sciences.

Le site est en ligne, à l'adresse <http://www.ampere.cnrs.fr/>. Il propose déjà de nombreux textes d'Ampère, notamment sa correspondance (personnelle et scientifique), des documents sur ses activités à l'Académie des Sciences, ainsi qu'une présentation de plusieurs projets qui seront à terme exposés sur le site.



Figure 1-Capture d'écran de la page d'accueil du site Ampère

Outre la Cité des Sciences et l'Ecole Centrale, ce projet implique de nombreux autres acteurs, notamment le Musée Ampère situé à Poleymieux-au-Mont-d'or. Ce projet est en effet aussi un moyen de valoriser le patrimoine du musée et plus généralement le patrimoine lyonnais.



Figure 2-Musée Ampère à Poleymieux

L'objectif du projet mené sur un an et demi à l'Ecole Centrale (de septembre 2004 à janvier 2006) était de répliquer et de simuler numériquement une expérience d'Ampère, puis de présenter cette réplification et cette simulation sur le site Ampère.

L'expérience qui a été retenue est paradoxalement une expérience qui a en quelque sorte échoué. Il s'agit en effet de l'expérience sur les courants d'influence, réalisée à deux reprises par Ampère ; cette expérience aurait pu lui permettre de découvrir le phénomène physique d'induction, mais il n'est pas parvenu à expliquer complètement ses résultats et l'a laissée de côté. Cela rend son étude particulièrement intéressante du point de vue de l'histoire des sciences :

L'énigme de la « découverte manquée »

En 1831, Michael Faraday met en évidence un phénomène radicalement nouveau et en donne les lois. Le mouvement d'un aimant - ou bien un courant variable dans un circuit - crée un courant électrique dans tout circuit voisin. Cette induction électromagnétique, à l'origine des dynamos et des alternateurs, avait été entrevue par Ampère une dizaine d'années auparavant. Mais Ampère menait son expérience dans une tout autre perspective et changea à plusieurs reprises l'interprétation de cette « manip » en fonction de ses résultats (divergents) et au gré de ses hypothèses sur l'origine du magnétisme. Pour tenter de mieux comprendre ce qui s'est passé, des élèves-ingénieurs de l'Ecole Centrale Lyon vont « répliquer » en laboratoire, et simuler sur ordinateur, cette expérience dont le fonctionnement, sujet à bien des questionnements, a divisé les historiens. Suspense. Et conclusion, dans un an, sur le [site Ampère](#).

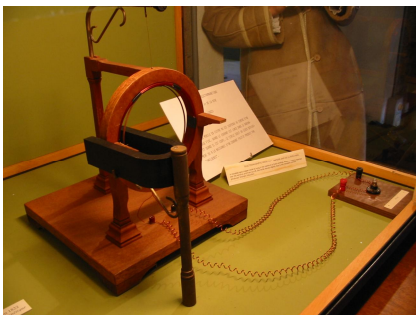
(Article publié dans le magazine CNRS Thema n°5, 4^{ème} trimestre 2004)

Dans une première partie, ce rapport présente d'abord en détail l'expérience menée par Ampère, puis développe notre travail pour comprendre l'expérience, interpréter ses résultats, et la présenter sur le site Ampère. La deuxième partie analyse le processus de projet, c'est-à-dire la manière dont nous avons appréhendé le projet et ce qu'il nous a apporté.



Figure 3-Statue d'Ampère à Lyon

PARTIE 1 : PARTIE SCIENTIFIQUE :



*Figure 4-Reproduction de l'expérience au musée
Ampère*



Figure 5-En cours de Réalisation

Chapitre 1 : L'expérience retenue :

Ce projet repose sur une expérience d'Ampère qui est présentée en détail dans cette première partie.

1) Son contexte :

Commençons par replacer l'expérience dans le contexte de l'époque, en rappelant l'état des connaissances sur l'électricité et le magnétisme au moment où elle est réalisée par Ampère.

✓ L'état des connaissances sur l'électricité au début du XIXème siècle :

Au début du XIXème siècle, l'essence même de l'électricité reste mystérieuse. On se la représente comme un « fluide subtil ».

Au XVIIIème siècle, la plupart des théoriciens européens ont ainsi vu l'électricité comme une substance fluide circulant entre les corps. Ils parlaient alors d'effluves électriques. En Amérique, Franklin s'est opposé à cette théorie en proposant en 1750 le principe de l'action à distance pour expliquer l'attraction ou la répulsion s'exerçant entre deux corps électrisés, cette attraction ne se produisant que quand l'un des corps est en déficit ou en surplus de fluide électrique.

Ce désaccord entre effluves et action à distance est loin d'être le seul qui pose problème à l'époque. Par exemple, certains physiciens comme Coulomb pensent que l'électricité est composée de deux fluides, alors que d'autres comme le physicien anglais Cavendish raisonnent sur l'hypothèse d'un fluide unique.

Du point de vue empirique, les expériences ont porté jusqu'alors uniquement sur l'électricité statique. Coulomb, acceptant le principe de l'action à distance, a notamment montré en 1785 grâce à la balance qui porte aujourd'hui son nom que la force qui s'exerce entre deux corps chargés est proportionnelle à l'inverse du carré de la distance qui les sépare.

L'œuvre de Coulomb est aujourd'hui la base de l'électrostatique, mais il convient de noter qu'à l'époque, en raison des désaccords évoqués précédemment, elle n'est pas toujours perçue comme telle par ses contemporains.

Il est donc important de comprendre que la théorie de l'électricité n'en est alors qu'à ses débuts, et que ce qui semble aujourd'hui « évident » reste à l'époque très flou.



Figure 6-Balance de Coulomb

✓ La pile Volta : pour la première fois l'électricité devient dynamique...

Vers 1800, un scientifique italien, Alessandro Volta, fait une découverte qui marque un tournant dans l'histoire des recherches sur l'électricité : il met en effet au point une source d'électricité qui fournit un courant continu (notons qu'à l'époque on ne parlait pas encore de courant mais de conflit électrique). Cette découverte porte aujourd'hui le nom de son inventeur : la pile Volta.

Pour créer cette pile, il empile successivement des disques de zinc, de carton imbibés d'eau salée et de cuivre.



Figure 7-Pile Volta reproduite au musée Ampère

La pile Volta est en fait formée d'un ensemble de piles élémentaires : au niveau de chaque ensemble {disque de cuivre-disque de carton imbibé d'eau-disque de zinc} se produit une réaction chimique (une réaction d'oxydoréduction) qui crée le mouvement d'ions (atomes ou groupes d'atomes ayant gagné ou perdu un ou plusieurs électrons, et par conséquent chargé positivement ou négativement). C'est le mouvement d'ensemble de ces ions qui permet l'établissement d'un courant.

A l'époque cependant, cela n'est pas aussi clair : les scientifiques se sont d'abord demandés si le fluide galvanique mis en jeu dans la pile était bien le fluide électrique, puis ils ont cherché à expliquer le fonctionnement de la pile, à savoir comment le fluide était créé et mis en mouvement. Beaucoup de physiciens ont cru pouvoir expliquer le fonctionnement de la

pile par les lois de l'électrostatique, passant ainsi à côté des effets chimiques.

✓ Oersted : premier lien entre l'électricité et le magnétisme :

Vers 1820, on connaît donc l'électricité grâce notamment à la balance de Coulomb et à la pile de Volta. On connaît également le magnétisme, mais aucun lien théorique n'est établi entre ces deux ordres de phénomènes.

Oersted est le premier à affirmer ce lien: en 1820, il découvre qu'un « conflit » électrique dévie une aiguille aimantée.

Cette découverte fait de lui le fondateur d'une nouvelle discipline, l'électromagnétisme.

✓ Ampère et l'électromagnétisme :



Figure 8-Portrait d'Ampère

L'expérience d'Oersted est présentée en France par François Arago le 11 septembre 1820, devant l'Académie des Sciences, dont André Marie Ampère est membre depuis 1814. Ampère se passionne immédiatement pour cette découverte.

En 1820, Ampère est déjà un scientifique reconnu, pour ses travaux en mathématiques (il est d'ailleurs professeur de mathématiques à l'École Polytechnique depuis 1809), en chimie et sur la théorie de la lumière.

Ampère est bouleversé par la découverte d'Oersted. Il passe la semaine à réfléchir fiévreusement. Et, dès le 18 septembre, puis le 25 septembre, il donne lecture de ses premières notes et montre que l'électricité en mouvement est la source des actions magnétiques.

C'est Ampère qui crée la notion de courant électrique, il lui attribue une direction et un sens : c'est la fameuse règle du bonhomme d'Ampère

La règle du bonhomme d'Ampère :

Un observateur placé sur la bobine, le courant entrant par ses pieds et sortant par sa tête, indique le sens du champ magnétique par son bras gauche lorsqu'il regarde le centre de la bobine.

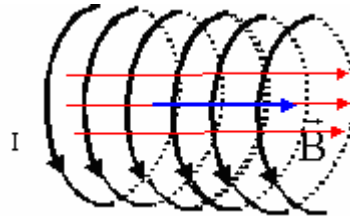


Figure 9-Illustration de la règle du bonhomme d'Ampère

Les résultats d'Ampère sont donc impressionnants par leur quantité et par la rapidité avec laquelle il les obtient. Ampère montre que non seulement les courants agissent sur les aimants mais qu'ils agissent également les uns sur les autres. Il met ainsi en évidence que deux fils parcourus par des courants de même sens s'attirent alors que des fils parcourus par des courants de sens contraires se repoussent.

Pour expliquer les propriétés magnétiques de l'aimant, il évoque des courants circulaires ayant leur siège dans la matière. Il parle de « courants particuliers ». Toutes les interactions entre aimants et courants peuvent ainsi dans cette optique s'interpréter comme des interactions entre courants.

C'est au cours de ses recherches sur l'électromagnétisme qu'Ampère a réalisé l'expérience sur laquelle repose ce projet. Cette expérience aurait pu lui permettre de découvrir le phénomène d'induction, mais il est passé à côté du phénomène qui sera finalement mis en évidence 10 ans plus tard par Michael Faraday.

✓ Faraday et l'induction :



Figure 10-Portrait de Faraday

Contrairement à Ampère, Faraday n'a aucune éducation mathématique et sa contribution à la découverte de l'électricité est celle

d'un expérimentateur. Il est en cela un homme à part dans la science de son temps. Il a beaucoup travaillé à des travaux portant sur la chimie.

Tout comme Ampère, il commence à s'intéresser à l'électromagnétisme après avoir pris connaissance de la découverte d'Oersted. Il s'intéresse à la conversion de l'électricité en magnétisme, ce qui le conduit notamment à inventer le premier moteur électrique.

Il s'intéresse ensuite à l'effet inverse : la conversion du magnétisme en électricité. En 1831, il met ainsi en évidence le phénomène d'induction : il montre que la variation du flux d'un champ magnétique (un aimant qui bouge, établissement d'un courant dans un circuit électrique) crée un courant induit dans un conducteur.

Il a également l'intuition que le temps intervient dans le phénomène.

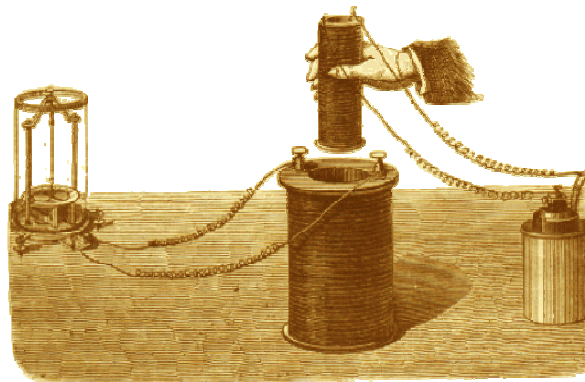


Figure 11-L'expérience de Faraday

Dans l'expérience qui lui a permis de comprendre le phénomène d'induction, Faraday a utilisé deux bobinages, l'un relié à un dispositif susceptible de détecter des courants électriques (un galvanomètre), l'autre relié à une batterie. Lorsque ce dernier circuit est ouvert ou fermé, Faraday a observé qu'un courant circulait dans le second fil qui n'avait pourtant aucun contact avec le premier.

Faraday en a déduit qu'un courant pouvait être induit dans un circuit par un circuit voisin. Il a également remarqué que l'induction ne se produisait que lors de l'ouverture ou de la fermeture du circuit. Il en a ainsi déduit que c'était la variation du flux magnétique qui induisait le courant.

C'est également Faraday qui propose de décrire l'action de l'électricité en termes de champ électromagnétique plutôt que de mouvements de particules chargées.

C'est donc dans ce contexte historique, se situant entre Oersted et Faraday, qu'Ampère réalise l'expérience des courants d'influence.

2) La réalisation de l'expérience par Ampère:

Ampère a en fait réalisé par deux fois l'expérience des courants d'influence. Ces deux réalisations ont donné des résultats différents ; lors de la deuxième réalisation, Ampère entrevoit le phénomène d'induction, mais ne parvient pas à le formaliser complètement. Nous allons maintenant tenter dans cette partie de détailler la démarche d'Ampère et ses interprétations des résultats obtenus lors de ces deux réalisations.

✓ Première réalisation de l'expérience : juillet 1821 :

Lorsqu'Ampère réalise pour la première fois l'expérience en 1821, il a adopté l'hypothèse des courants particuliers : il est convaincu que les propriétés magnétiques des aimants proviennent de courants circulaires autour de chaque particule magnétique.

La question est de savoir si les courants sont produits par « influence » lors de l'aimantation ou s'ils résultent de l'orientation de courants préexistants.

C'est dans ce but qu'il réalise l'expérience cherchant à mettre en évidence des courants d'influence.

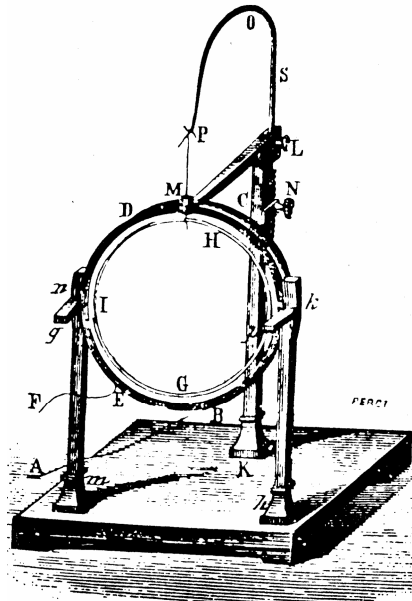


Figure 12-Schéma du dispositif de l'expérience
(figure dans plusieurs sources, voir en annexe)

La gravure ci-dessus est la seule représentant l'expérience provenant d'Ampère.

Grâce à cette gravure et au descriptif succinct qu'en a fait Ampère (voir en annexe), on peut reconstituer le dispositif de l'expérience: Ampère suspend un anneau de cuivre à l'aide d'un fil très fin (certainement un fil de soie- n'oublions pas qu'Ampère était lyonnais). Ce fil traverse un cadre en bois autour duquel est enroulée une bobine. La bobine et l'anneau de cuivre doivent être au départ contenus dans le même plan.

La bobine est reliée à une source de courant électrique. L'anneau mobile lui n'est relié à aucune source de courant.

De plus, Ampère utilise un ou deux barreaux aimantés ; on peut penser que lors de cette première réalisation de l'expérience ces barreaux aimantés étaient placés sur les deux petites règles kq nq représentées sur la gravure ci-dessus.

Bien qu'on ne possède pas de documents d'Ampère l'affirmant, on peut penser qu'Ampère cherchait à voir s'il était possible de produire un courant dans l'anneau de cuivre voisin par influence du courant parcourant la bobine. Il espérait sans doute mettre en évidence cet éventuel courant par une rotation de l'anneau provoquée par l'attraction ou la répulsion par les barreaux aimantés.

Lors de cette première réalisation, l'anneau reste immobile... Ampère en conclut que les courants ne peuvent pas produire des courants par influence. Cela montre donc selon lui que les courants sont préexistants et de manière indirecte qu'ils sont particuliers. Selon lui ainsi, les courants moléculaires existent avant la magnétisation, mais avec des orientations aléatoires et ils sont simplement orientés lors de l'aimantation.

✓ Seconde réalisation de l'expérience : Genève, septembre 1822 :

Ampère réalise malgré tout une seconde fois l'expérience en compagnie d'Auguste de la Rive. Cette seconde réalisation s'inscrit dans le cadre d'une série d'expériences qu'ils réalisent en 1822, dans le but d'approfondir la théorie de l'électromagnétisme.

Le dispositif de l'expérience est le même que lors de la première réalisation, sauf que pour cette réalisation, Ampère utilise un aimant plus puissant en forme de fer à cheval. On trouve cette fois une indication sur la position de cet aimant dans une lettre adressée à Faraday une dizaine d'années plus tard, où Ampère évoque cette expérience et explique qu'elle aurait pu lui permettre de mettre en évidence le phénomène d'induction.

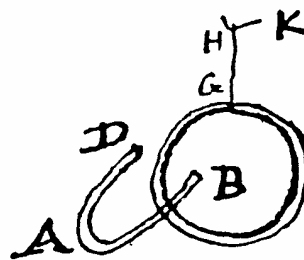


Figure 13-Schéma montrant la position de l'aimant dans la seconde réalisation

Ampère et De la Rive observent une rotation de l'anneau lorsqu'ils envoient un courant dans le circuit primaire.

✓ L'interprétation de la seconde expérience par Ampère :

De manière surprenante, Ampère ne prête pas beaucoup d'attention à cette expérience, qui a pourtant donné des résultats contradictoires et semble faire apparaître un phénomène inconnu.

Il laisse à De la Rive le soin de rédiger un compte-rendu de cette expérience (en annexe), compte-rendu qu'il reprendra par la suite. Ce compte-rendu reste très évasif quant à leurs conclusions. « *Ce fait de la production de courants électriques par influence, très intéressant par lui-même, est d'ailleurs indépendant de la théorie générale de l'action électrodynamique.* », affirme Ampère dans un compte-rendu rédigé en 1822 et publié en 1885 (voir en annexe).

Le compte-rendu de l'expérience fait par De la Rive montre donc cependant qu'ils ont compris qu'il était possible de produire un courant par influence d'un autre courant, mais ils semblent penser que le courant produit par influence existe tant qu'un courant circule dans la bobine :

« Cette expérience importante montre donc que les corps qui ne sont pas susceptibles, au moyen de l'influence des courants électriques, d'acquérir une aimantation permanente, comme le sont le fer et l'acier, peuvent du moins acquérir une sorte d'aimantation passagère pendant qu'ils sont sous cette influence. » (Extrait du compte-rendu en annexe)

Ils n'ont pas ainsi conscience de l'aspect transitoire du phénomène: en fait, un courant apparaît dans l'anneau mobile uniquement lorsqu'il y a une variation de courant dans la bobine.

Cependant plus que cette erreur, inhérente à la recherche scientifique, qui est faite de tâtonnements, c'est surtout le désintérêt d'Ampère pour cette expérience qui peut surprendre. Plusieurs arguments peuvent être avancés pour expliquer cette attitude : tout d'abord, Ampère était à l'époque surchargé de travail, et cette expérience n'occupait pas une place centrale dans ces recherches, d'autant plus que le résultat de cette seconde réalisation ne lui permet plus de déterminer si les courants sont exclusivement produits par un alignement de courants moléculaires préexistants ou par influence d'un autre courant, ou si ces deux phénomènes interviennent conjointement.

Ampère n'était en effet pas attiré par la nouveauté en elle-même et ne s'intéressait à l'expérience que dans la mesure où elle permettait de confirmer sa théorie. Il s'oppose en cela à Faraday, qui était un expérimentateur passionné par l'observation et la compréhension de nouveaux phénomènes. Si on peut de ce point de vue avoir une vision assez critique sur le travail d'Ampère, il faut malgré tout noter qu'Ampère a eu le mérite de ne pas se laisser entraîner dans une quête effrénée de la nouveauté qui a desservi beaucoup de ses contemporains.

Surtout, on peut penser que la faible rotation de l'anneau a fait douter Ampère quant aux conclusions à tirer de cette expérience. Ce doute s'exprime d'ailleurs dans le compte-rendu qu'il a lui-même rédigé en 1822.

«Le circuit fermé placé sous l'influence du courant électrique dédoublé, mais sans aucune communication avec lui, a été attiré et repoussé alternativement par l'aimant, et cette expérience ne laisserait, par conséquent, aucun doute sur la production des courants électriques par influence, si l'on ne pouvait soupçonner la présence d'un peu de fer dans le cuivre dont a été formé le circuit mobile. »

L'expérience des courants d'influence n'a donc pas été pleinement exploitée par Ampère qui n'est pas parvenu à expliquer complètement le nouveau phénomène mis en jeu, que nous connaissons aujourd'hui sous le nom d'induction.

3) Interprétation moderne de l'expérience :

La théorie de l'induction établie en 1831 par Faraday permet de proposer une interprétation moderne de l'expérience.

Modélisation du circuit :

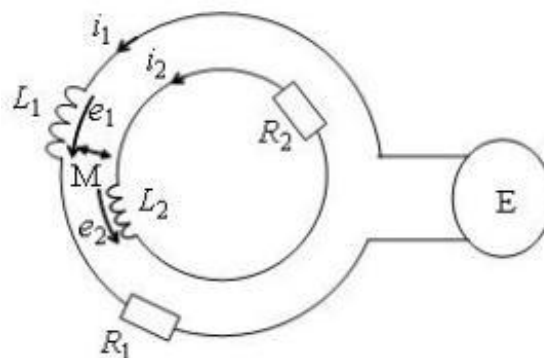


Figure 14 : Modélisation du circuit

- Lorsqu'on ouvre ou on ferme le circuit primaire, il se produit une variation de courant dans la bobine.

Cette variation de courant conduit à une variation du champ magnétique associé à ce courant. La variation du flux d'induction à travers la surface de l'anneau mobile crée alors un courant induit dans celui-ci.

Dès que le courant devient constant dans la bobine, le phénomène d'induction cesse. On retrouve ici que l'induction est un phénomène transitoire, fonction de la dérivée temporelle du champ et donc du courant.

- Sans la présence de l'aimant, l'anneau parcouru par le courant induit resterait cependant immobile. En effet, en raison de la symétrie du

problème, il y a équilibre des forces : on peut voir sur le schéma que, pour deux points diamétralement opposés sur l'anneau, l'effort résultant est nul.

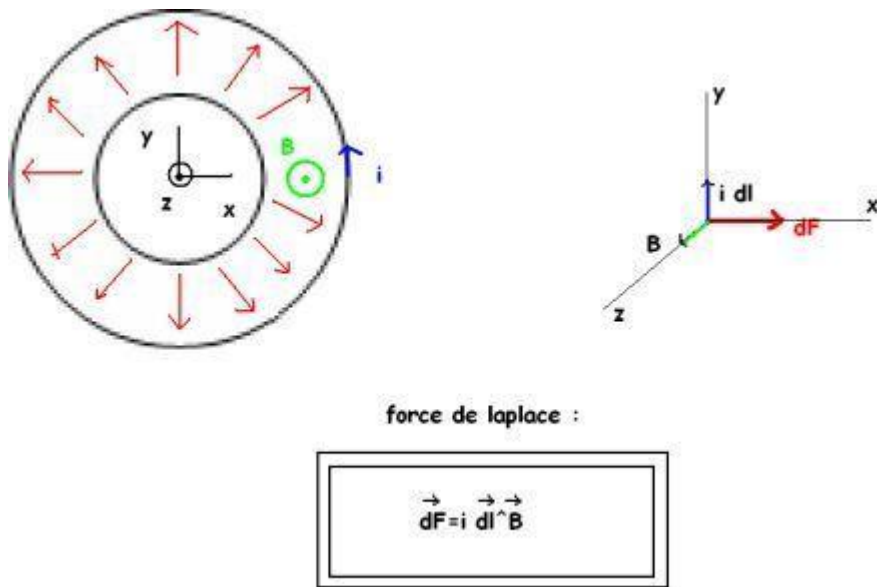


Figure 15 : Forces de Laplace s'exerçant sur l'anneau

- C'est donc l'addition du flux magnétique d'induction et du flux de l'aimant qui entraîne un déséquilibre des forces et donc le mouvement de l'anneau.

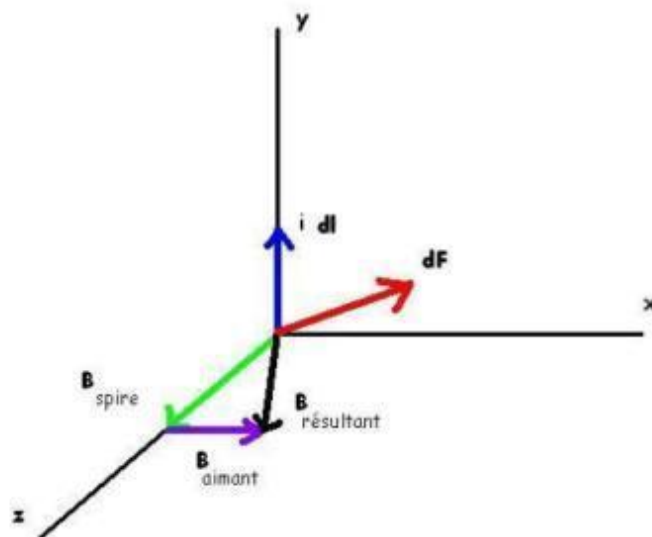


Figure 16 : Champ B résultant du champ de l'aimant et du champ créée par les courant

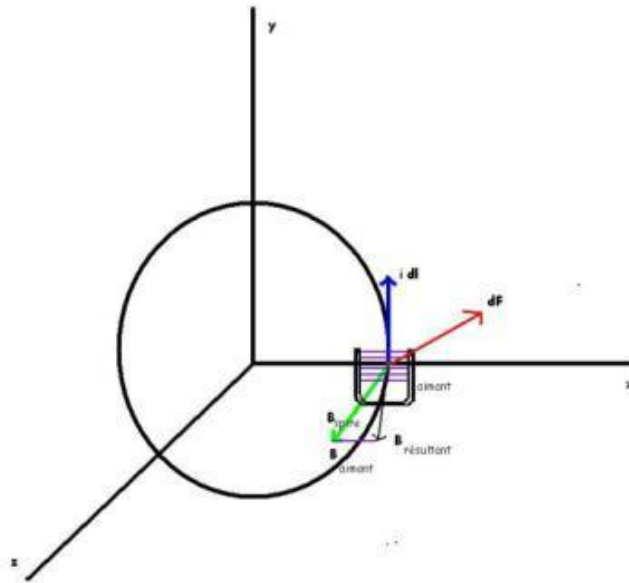


Figure 17 : Déséquilibre de l'anneau

Cette interprétation sera à confronter avec les résultats de la réplcation et de la simulation.

4) L'intérêt de cette expérience du point de vue de l'histoire des sciences :

Cette expérience est tout d'abord intéressante du point de vue historique car elle pose le problème du processus d'expérimentation. Elle montre ainsi la difficulté de poser une hypothèse, de trouver une expérience pour tenter de la confirmer ou de l'infirmer, et d'ensuite d'interpréter correctement les résultats de cette expérience, en acceptant de rejeter l'hypothèse de départ, ou comme cela est le cas dans l'expérience d'Ampère, en imaginant de nouveaux phénomènes.

En outre, elle pose le problème de la transmission des connaissances. On a vu en effet qu'Ampère avait laissé peu de traces de son travail : en particulier, le schéma du dispositif de l'expérience est relativement imprécis, notamment sur la position du ou des aimants. Ainsi, sans le schéma explicatif griffonné sur la lettre adressée à Faraday, il n'est pas évident de deviner la position de l'aimant en fer à cheval. Cela a d'ailleurs conduit à une erreur d'interprétation lors d'une des réplcations de cette expérience (nous en reparlerons dans la seconde partie (§II-2)). Ampère est également resté très imprécis sur les résultats, il existe plusieurs comptes-rendus de l'expérience, qui diffèrent sur certains points, ce qui complique la tâche des scientifiques s'intéressant à cette expérience, en particulier pour ceux qui souhaitent la reproduire.

L'étude historique de l'expérience des courants d'influence permet donc de comprendre les problèmes qu'elle met en jeu. Grâce à la connaissance de la théorie de l'induction de Faraday il est possible de proposer une première interprétation de l'expérience. Cependant, la lecture d'articles portant sur l'expérience apporte plusieurs interrogations concernant ses résultats. Il est donc nécessaire de confronter cette interprétation moderne de l'expérience avec une réplcation et une simulation numérique.

Chapitre 2 : La réplification :

La réplification est parfois utilisée par les historiens des sciences pour « éclairer » des expériences du passé. Elle est apparue indispensable pour permettre la compréhension de l'expérience d'Ampère, d'autant plus que cette dernière avait déjà été répliquée à plusieurs reprises.

1) L'intérêt de la réplification expérimentale en histoire des sciences :

L'idée d'une réplification historique est de tenter de reproduire une expérience historique en se rapprochant le plus possible de la réalisation originale, et ce en s'appuyant sur les textes de l'époque. Le terme réplification, emprunté par les historiens des sciences anglo-saxons à la génétique, laisse même supposer une reproduction à l'identique, ce qui demeure cependant un horizon impossible

On peut au premier abord s'interroger sur le bien fondé d'une telle démarche dans le cadre d'une étude historique. La crainte qu'aucun intérêt ne surgisse lors d'une réplification est même couramment répandue. Une trop grande confiance dans la science peut en effet laisser penser que l'on retrouve toujours, si le travail d'expérience est correctement mené, ce qui a été établi antérieurement : « les explications théoriques ne sont-elles pas aujourd'hui bien connues et les problèmes techniques ne sont-ils pas parfaitement maîtrisés ? » peut-on penser.

En réalité, la réplification permet de mettre en évidence des hypothèses faites par les expérimentateurs, des difficultés qu'ils ont rencontrées lors de la réalisation de l'expérience qui sont rarement mentionnées dans leurs comptes-rendus de l'époque. Elle mène à découvrir qu'une expérience en apparence simple nécessite en fait un grand savoir-faire qu'il est parfois difficile de maîtriser. On sait notamment qu'au XIX^{ème} siècle, les chercheurs s'appuyaient beaucoup sur le travail d'aides de laboratoires très compétents.

Parfois même, le travail de réplification permet de mettre en évidence des inexactitudes dans les comptes-rendus. Par exemple, « *Otto Siburn, refaisant les expériences de Joule rapporte l'impossibilité pour ce dernier d'avoir utilisé les pales décrites dans son article [...] (qu'il reconstitue à partir de restes de musée et des valeurs numériques rapportées par Joule).* » (Dominique Pestre, dans *Restaging Coulomb*). La réplification permet donc d'apporter des arguments nouveaux dans le débat historique.

En outre, il ne faut pas oublier que les résultats de certaines expériences demeurent incertains ou inexploités. Dans ces cas, la réplification se justifie pleinement.

Il faut cependant noter que la réplification reste une démarche originale en histoire des sciences. Elle n'est pratiquée que par quelques centres de recherche, notamment celui de l'université d'Oldenburg en Allemagne.

2) Les différentes répliques de l'expérience d'Ampère :

L'expérience d'Ampère a déjà été étudiée et reproduite au moins quatre fois pendant les 180 ans qui ont suivi la manipulation d'Ampère et De la Rive. Ces nouvelles réalisations ont apporté de nouvelles interrogations concernant les résultats de l'expérience des courants d'influence.

La première réplique a été effectuée par Silvanus Thompson en 1895 quelques temps après que la Société Française de Physique ait publié la Collection de Mémoires relatifs à la physique, où était relatée l'expérience d'Ampère. Ses écrits ne rendent pas compte de la façon dont il a procédé, ils évoquent principalement la réalisation de l'expérience par Ampère et ne sont malheureusement pas très explicites sur ses résultats :

« I have repeated the experiment of Ampère in the form originally shown to De la Rive. It is quite easy of performance: but the relatively great moment of inertia of the copper circle masks the purely transitory effect of the impulse which the ring receives each time the current is turned on or off in the outer coil. »
(Silvanus P. Thompson, in Note on a Neglected Experiment of Ampère, 1895)

Thompson semble ainsi signifier que l'anneau ne revient pas immédiatement vers sa position de départ en raison selon lui de son grand moment d'inertie, qui masque l'aspect transitoire du phénomène. Il s'agit là d'un point qu'il conviendra de discuter à l'aide de la réplique.

La seconde a été l'œuvre de Devons en 1978, qui est identique à celle que fera Mendoza plus tard (les deux hommes ont été en contact et Devons supervisera l'expérience de Mendoza). Devons ne décrira pas le fonctionnement de sa reproduction.

L'expérience a ensuite été reproduite par le *Deutsches Museum in Munich* en 1981. Cette réplique est intéressante du point de vue de l'histoire des sciences ; elle illustre bien en effet la difficulté de la transmission des connaissances : n'ayant pas encore accès à la correspondance d'Ampère et donc à la lettre d'Ampère à Faraday précisant la position de l'aimant lors de la seconde réalisation, les expérimentateurs ont mal interprété le descriptif du dispositif de l'expérience et ont placé l'aimant en U autour du circuit extérieur entier.

Enfin la dernière réplique en date a été effectuée par Eric Mendoza en 1985 à l'université de Jérusalem. Mendoza a rédigé un rapport de cette expérience dans un article publié dans une revue scientifique. (*des extraits de son article figurent en annexe*).

Mendoza donne des précisions sur le matériel qu'il a utilisé lors de sa manipulation, mais ne précise pas la valeur de tous les paramètres de son expérience, il manque notamment des paramètres électriques (valeurs des résistances et des inductances des circuits primaires et secondaires).

Mais ce sont surtout ses conclusions qui semblent intéressantes puisqu'il affirme que la réplique de l'expérience qu'il a faite pourrait expliquer les conclusions d'Ampère et De La Rive : il dit avoir observé une déviation plus ou moins constante pendant tout le temps où on maintient le courant et non une

déviations seulement au moment où le courant s'établit : il parle d'une déviation de 13° au moment de l'établissement du courant, cette déviation étant encore de 10° au bout de 30 secondes. Mendoza explique que l'appareil se comporte en fait comme un galvanomètre balistique amorti, ou un galvanomètre à cadre mobile.

Il précise que le circuit mobile reste à une déviation plus ou moins fixe mais que si le courant continuait, il reviendrait de lui-même. Ampère n'a pu le voir car il ne disposait pas de batterie qui puisse fournir un courant pendant un temps assez long, donc le retour s'observe quand on coupe le courant.

Cette observation pourrait expliquer pourquoi Ampère et De la Rive n'ont pas vu l'aspect transitoire du phénomène et sera donc à confronter avec nos propres résultats.

L'étude de ces différentes répliques a donc mis en évidence un point à discuter à partir de notre réplique et de notre simulation : le retour de l'anneau de cuivre à sa position initiale.

3) Notre réplique :

✓ La réalisation de notre réplique :

Notre objectif était de réaliser une réplique de l'expérience d'Ampère la plus fidèle possible à l'esprit de l'époque.

Nous disposons de plusieurs sources d'informations, notamment la gravure laissée par Ampère et la reproduction déjà réalisée au musée Ampère de Poleymieux.

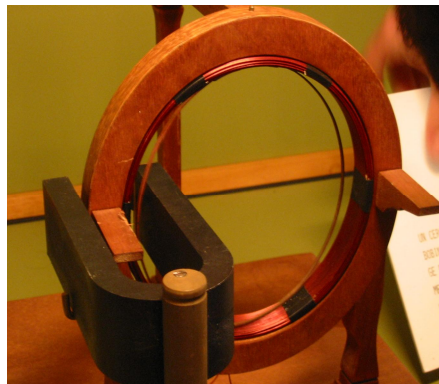


Figure 18-Reproduction de l'expérience au musée Ampère

La visite du musée Ampère a donné des points de départ essentiels dans la réalisation de notre dispositif, en nous donnant une première idée de l'allure du dispositif (sa taille...).

Par la suite, nous avons cherché à nous baser principalement sur les documents d'époque, dans le but de réaliser une réplique aussi proche que possible de l'originale. Nous avons par exemple choisi de réaliser un bobinage extérieur, comme sur la gravure, alors que sur la reproduction du musée Ampère le bobinage est intérieur.

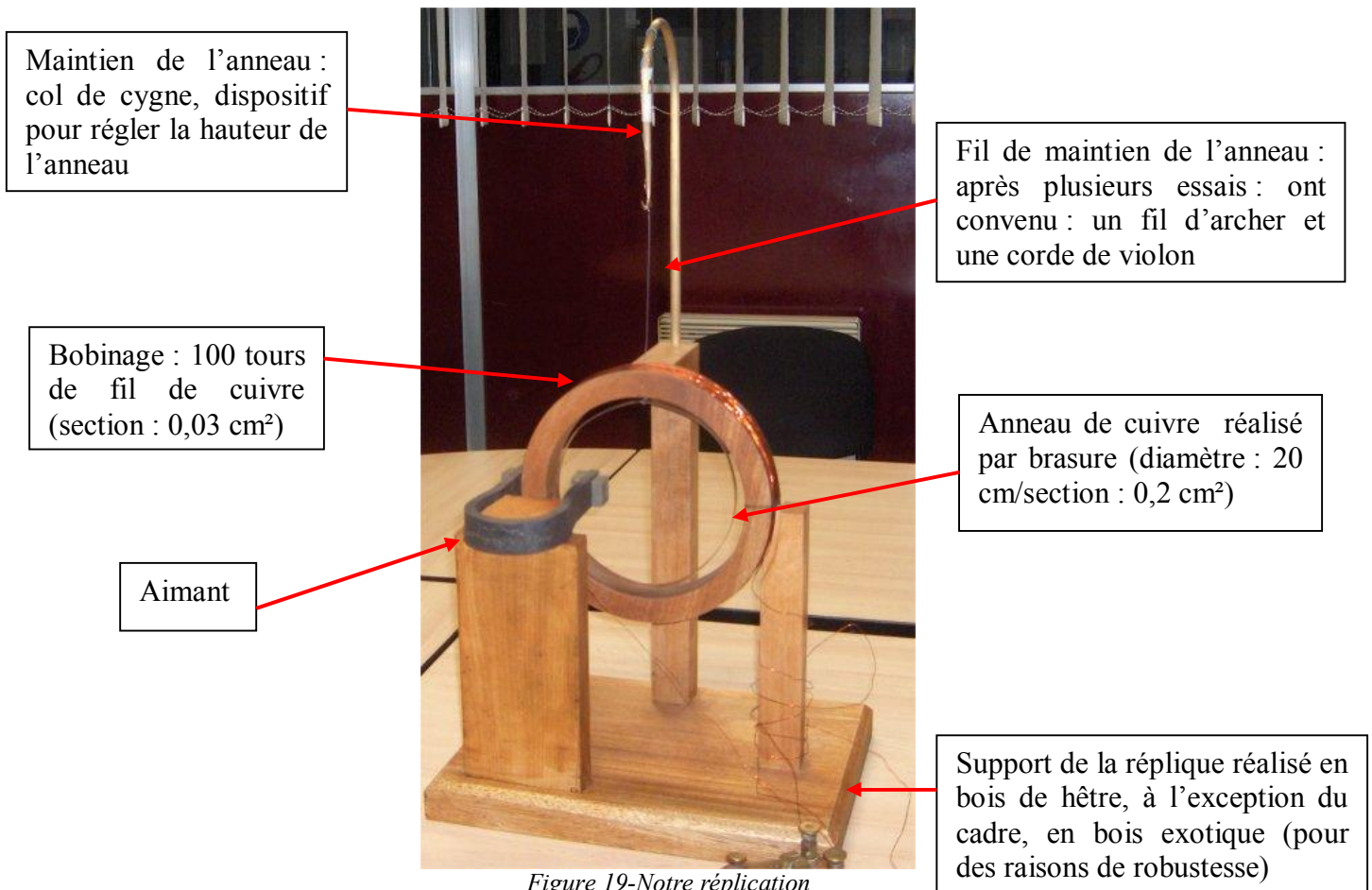
Cette réalisation a mis en évidence la difficulté de la démarche de réplique, qui fait aussi son intérêt. Il a été nécessaire de faire de nombreux choix, concernant les matériaux constitutifs de l'expérience

ainsi que son assemblage, faute de précisions dans les textes de l'époque.

Il a fallu également faire face à des limitations techniques et de temps. Nous avons été obligés de nous limiter à reproduction approchante, notamment pour l'alimentation que nous avons réalisée à l'aide de batteries de voiture (on peut penser qu'à l'époque l'alimentation était réalisée par des piles Volta montées en parallèle, qui avaient sans doute une plus grande impédance interne et qui fournissaient donc moins de courant).

Pour être fidèle à l'esprit de l'époque, le bobinage aurait également dû être gainé, mais cela n'influe en rien sur les résultats.

L'illustration suivante résume les choix faits pour notre réplique :



✓ Les résultats obtenus :

On réalise l'expérience des courants d'influence avec notre réplique.
(on en détaille ses paramètres électriques et mécaniques dans le chapitre 3)
Le circuit primaire est alimenté par 2 batteries 12 Volts en série.

➤ Observation du mouvement de l'anneau :

-lors de l'établissement du courant : une oscillation visible de l'ordre d'une dizaine de degrés suivie de deux oscillations beaucoup plus faibles puis de très faibles oscillations autour de la position d'équilibre. L'anneau semble revenu à sa position d'équilibre au bout de 10 secondes environ.

-on coupe le courant au bout de 20 secondes : on observe alors une oscillation dans le sens contraire de celle obtenue lors de l'établissement du courant, suivie également par deux oscillations de plus faible amplitude autour de la position d'équilibre.

De la Rive affirme dans son compte-rendu publié en 1822 : « *En présentant à un côté de cette lame un aimant en fer à cheval, très fort, on l'a vu tantôt s'avancer entre les deux branches de l'aimant, tantôt au contraire en être repoussé, suivant le sens du courant, dans les conducteurs environnants.* ». La phrase de De la Rive reste ambiguë quant au type de mouvement observé (rotation ou translation) ; sur notre réplique, le mouvement observé apparaît nettement comme un mouvement de rotation, avec des oscillations, qui ne sont pas évoquées par De la Rive.

Sur notre réplique, le retour de l'anneau à sa position de départ est rapide, et met ainsi nettement en évidence l'aspect transitoire du phénomène. Cela ne semble pas corroborer les observations de Thompson et Mendoza ; Mendoza par exemple parle d'un angle de rotation de 13°, décroissant à 10° après 30 secondes. (cf. annexe 2). La simulation circuit devrait pouvoir apporter des éléments sur ce point car elle permettra de faire des essais avec des paramètres autres que ceux de la réplique.

➤ Relevé des intensités dans la bobine et l'anneau :

Dans le but de pouvoir comparer réplique et simulation, nous avons également relevé les valeurs du courant dans le circuit primaire et dans l'anneau. Nous avons utilisé un shunt et un enregistrement haute fréquence pour réaliser ces mesures.

Le shunt est une simple résistance calibrée que l'on monte en série dans le circuit. On branche à ses bornes un voltmètre. De la connaissance de la tension à ses bornes, on peut en déduire la valeur du courant qui circule dans le circuit.

Ce shunt a été branché en série dans le circuit primaire. Pour la mesure de la tension, il a été associé à un oscilloscope utilisé sous le mode « capture » (mono balayage).

Le résultat obtenu est le suivant :

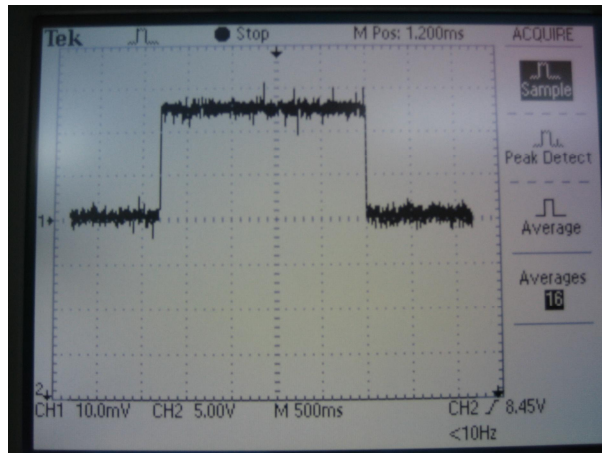


Figure 20-Courant dans le circuit primaire

L'allure du courant dans la bobine est donc voisine de celle d'un créneau, avec des fronts de montée et de descente très raide. Le courant est de l'ordre de 5A. Cette valeur pourra être utilisée comme valeur de référence pour la simulation.

La mesure du courant dans l'anneau a été beaucoup plus difficile à réaliser. Elle a nécessité l'utilisation d'un anneau de cuivre coupé en deux.

Cet anneau a été placé à la place de l'anneau utilisé sur la réplique à l'intérieur du cadre en bois. Il a ensuite été mis en série avec le shunt grâce à des pinces crocodiles comme indiqué sur le schéma suivant :

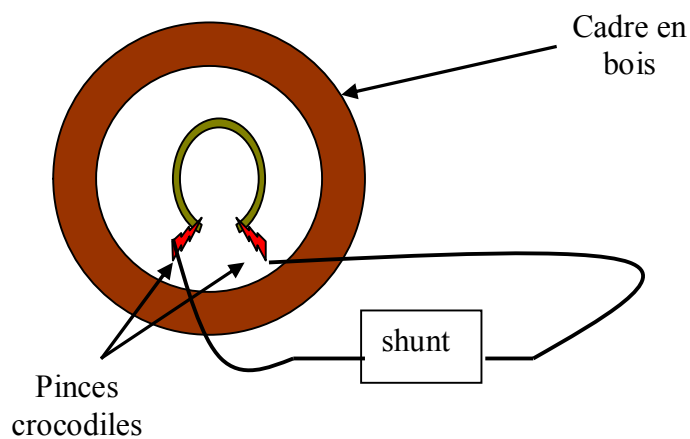


Figure 21-Dispositif pour mesurer le courant dans l'anneau

Comme pour le circuit primaire, on place un oscilloscope en mode « capture » branché sur les deux bornes du shunt. On obtient alors la courbe suivante:

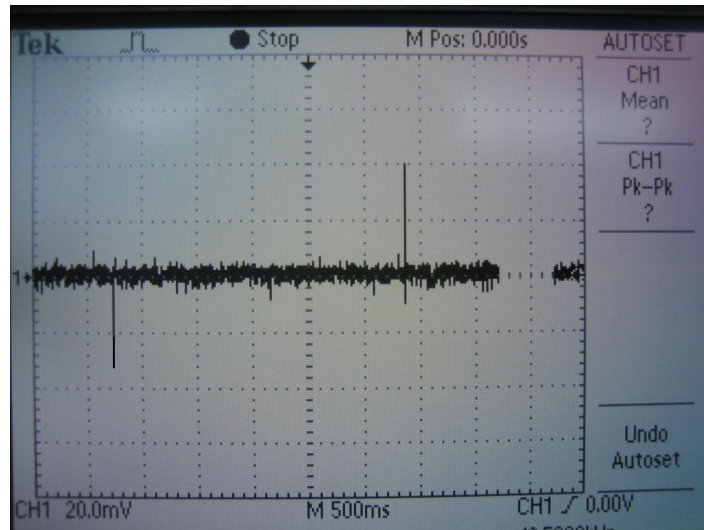


Figure 22-Courant dans l'anneau

Le premier pic correspond à l'instant où on appuie sur l'interrupteur : l'apparition du courant dans le circuit primaire crée par induction un courant dans l'anneau.

On a ensuite un laps de temps où le courant dans le secondaire est nul. Cela correspond à la période pendant laquelle le courant est constant dans la bobine.

Le second pic apparaît quand on lâche l'interrupteur. Il y a alors de nouveau création d'un courant par induction.

Notre courbe est bruitée, mais elle nous donne malgré tout une idée de l'ordre de grandeur du courant qui circule dans l'anneau : entre 5 et 10 A.

Ces mesures ont permis de vérifier le bon fonctionnement de notre expérience et d'obtenir des valeurs qui pourront nous servir de référence pour valider la simulation.

Réaliser cette réplique permet donc de comprendre à quel point la réplique d'une expérience historique est une tâche difficile et complexe. La quasi-absence d'information sur le montage a ainsi conduit à formuler des hypothèses et faire de nombreux choix... La réalisation de l'expérience a apporté des premiers éléments de réponse aux interrogations portant sur ses résultats. Cependant, certains points restent en suspens, ce qui justifie le choix d'associer à cette réplique une simulation circuit de l'expérience.

Chapitre 3 : La simulation circuit du phénomène :

1) Une nouvelle méthode en histoire des sciences :

L'histoire des sciences est une discipline ancienne qui a la possibilité de s'enrichir grâce aux progrès technologiques. Ainsi, nous avons aujourd'hui à portée de main des outils informatiques et appareils de mesures performants qui permettent d'avoir accès à de plus en plus de données, mais aussi de simuler des phénomènes avec précision. Cela permet d'apporter des éléments de compréhension supplémentaires dans la démarche d'historien des sciences.

Pour le projet Ampère, il a été choisi de simuler le phénomène d'induction et le mouvement de l'anneau mobile grâce au logiciel Simulink, contenu dans Matlab. Grâce à ce logiciel, nous pouvons visualiser toutes les grandeurs qui nous intéressent- il suffit d'avoir les équations électriques et mécaniques qui régissent le phénomène-. On peut donc calculer les flux, les courants dans les circuits primaire et secondaire, l'angle entre la bobine et l'anneau mobile etc. Utiliser Simulink est donc intéressant pour obtenir les courbes d'évolution temporelle des différentes grandeurs et les valeurs associées.

La simulation permet de plus des variations de paramètres et donc d'étudier l'influence des différents paramètres sur le phénomène qui nous intéresse. Elle est en cela parfaitement complémentaire de l'expérience physique réelle.

2) Mise en équation du phénomène :

L'utilisation de Simulink implique le choix d'un modèle qui représente les phénomènes électriques et mécaniques mis en jeu. Après seulement, il est possible d'écrire les équations et d'entrer des valeurs pour les différents paramètres (inductances, résistances...). Nous avons fait le choix d'effectuer la simulation en deux étapes selon le principe de parcimonie :

->Dans un premier temps, nous avons fait une simulation qui ne tient pas compte du mouvement relatif de l'anneau par rapport à la bobine, car ce mouvement a lui-même une influence sur le phénomène d'induction et complice donc la modélisation.

->Dans un second temps, nous avons raffiné le modèle en tenant compte du mouvement. Le modèle, par définition, n'est pas parfait : par exemple, le champ magnétique créé par l'aimant n'est pas vraiment constant dans l'entrefer. Dans l'idéal, il faudrait le cartographier. Il s'agit d'une approximation. Cela signifie qu'il faudra procéder à une validation du modèle.

✓ [Simulation du phénomène d'induction seul](#)

Voici une formulation simple du problème considéré : on dispose d'une bobine et d'un anneau de cuivre mobile, la bobine et l'anneau étant concentriques. La bobine est reliée à la source de courant. Que se passe-t-il lors de l'établissement du courant ?

Modélisation du circuit :

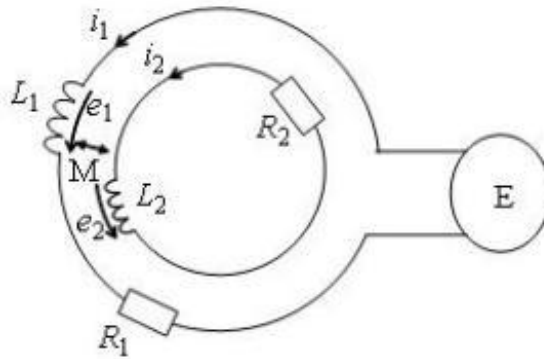


Figure 23-Modélisation du circuit

Le circuit 1 (i_1 , R_1 , L_1 , e_1) représente le bobinage fixe, alimenté par un générateur E en courant continu. Le circuit 2 (i_2 , R_2 , L_2 , e_2) représente l'anneau mobile. Il n'est pas alimenté.

Lorsque le courant s'établit, il se produit un phénomène d'induction : la variation du courant dans le circuit primaire crée une variation du champ magnétique. Cette variation est à l'origine d'une fem (force électromotrice) induite dans le circuit secondaire. Il apparaît donc un courant induit dans le circuit secondaire.

Nous détaillons ici les calculs (effectués avec les hypothèses simplificatrices habituelles) à titre indicatif ; nous cherchons à exprimer i_1 et i_2 ; pour cela nous écrivons deux équations qui correspondent à ce qui se passe du point de vue électrique dans les deux anneaux.

Expression de la fem induite :

Dans le circuit secondaire : $\phi_2 = \phi_{1 \rightarrow 2} + \phi_{2 \rightarrow 2} = Mi_1 + L_2i_2$

Mi_1 représente le flux du champ magnétique de la bobine 1 dans la bobine 2, alors que Li_2 représente le flux propre de la bobine 2.

D'après la loi de Faraday : $e = -\frac{d\phi}{dt}$

D'où : $e_2 = -M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt}$

De même, dans le circuit primaire : $e_1 = -M \frac{di_2}{dt} - L_1 \frac{di_1}{dt}$

Equations électriques :

On écrit la loi des mailles dans les 2 anneaux et on obtient le système :

$$\begin{cases} M \frac{di_2}{dt} + L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 = E \\ M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 = 0 \end{cases}$$

Avec ce système d'équations, il est possible de mettre en place un schéma-bloc Simulink très simple à l'aide des blocs montrés ci-dessous.

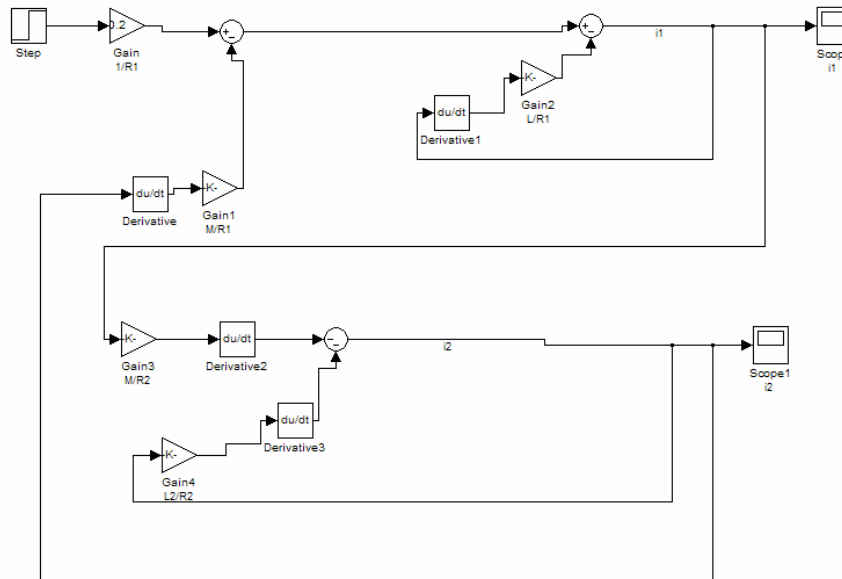


Figure 24-Schéma bloc sous Simulink pour la simulation du phénomène d'induction seul

✓ Simulation du phénomène d'induction avec mouvement

Cette fois-ci, on tient compte du mouvement de l'anneau mobile, et donc de l'aspect mécanique du problème. Désormais, l'inductance mutuelle est variable au cours du temps et il faut introduire de nouveaux paramètres : le moment de torsion du fil qui sert à tenir l'anneau mobile ainsi que le moment d'inertie de l'anneau mobile.

Sans la présence de l'aimant, l'anneau reste immobile. C'est l'ajout de l'aimant qui crée le mouvement (il crée une force de Laplace qui agit sur l'anneau mobile).

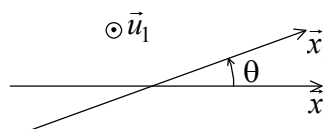


Figure 25-Position relative de l'anneau mobile et du bobinage fixe

Nous avons cette fois écrit quatre équations : une équation correspondant au phénomène mécanique (mouvement de l'anneau), deux équations traduisant ce qui se passe du point de vue électrique et une dernière équation traduisant la dépendance de l'inductance mutuelle par rapport à l'angle entre l'anneau mobile et le bobinage fixe.

Equation mécanique

Théorème du moment cinétique : $\frac{d\vec{\sigma}}{dt} = \overline{M}_{F_{ext}}$

Expression du moment cinétique : $\vec{\sigma} = J\dot{\theta}\vec{u}_z$

D'où : $\frac{d\vec{\sigma}}{dt} = J\ddot{\theta}\vec{u}_z$

Exprimons le moment des forces extérieures :

Les forces s'exerçant sur l'anneau sont :

i) le poids (mais il n'intervient pas dans le théorème du moment cinétique projeté suivant \vec{u}_z)

ii) la force de rappel (due au fil de torsion) de moment : $\vec{M} = -\mu\theta\vec{u}_z$

iii) les forces de Laplace : calculons leur moment :

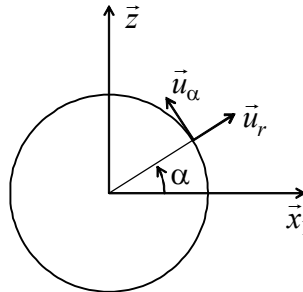


Figure 26-Définition des repères choisis

$$d\vec{f} = id\vec{l} \times \vec{B}$$

$$d\vec{M} = \vec{OM} \times d\vec{f} = R\vec{u}_r \times (id\vec{l} \times \vec{B}) = R\vec{u}_r \times (iRd\alpha\vec{u}_\alpha \times B\vec{u}_x)$$

En première approximation, on ne considère que \vec{B}_{aimant} et on néglige les variations de \vec{B} autour de la spire.

$$d\vec{M} = iR^2 B\vec{u}_r \times (\vec{u}_\alpha \times \vec{u}_x)d\alpha$$

En effectuant les calculs, on obtient :

$$\vec{M} \cdot \vec{u}_z = \pi i_2 R^2 B \cos\theta$$

On obtient alors l'équation mécanique en projetant le théorème du moment cinétique suivant l'axe \vec{u}_z .

$$J\ddot{\theta} + \mu\theta = \pi R^2 Bi_2 \cos \theta$$

Si on prend de plus en compte l'amortissement mécanique, l'équation devient :

$$J \frac{d^2\theta}{dt} + \alpha \frac{d\theta}{dt} + \mu\theta = \pi r Bi_2 \cos \theta \quad (1)$$

Equations électriques :

M dépend désormais du temps.

Ainsi :

$$\phi_2 = Mi_1 + Li_2$$

$$e = -\frac{d\phi_2}{dt} = -M \frac{di_1}{dt} - i_1 \frac{dM}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt}$$

On écrit la loi des mailles dans les deux anneaux :

$$\begin{cases} M \frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{dM}{dt} + L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 = E & (2) \\ M \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{dM}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 = 0 & (3) \end{cases}$$

Si on suppose de plus que M ne dépend que de θ et que cette dépendance s'écrit :

$$M = M_0 \cos \theta \quad (4)$$

On obtient un système de 4 équations à 4 inconnues : M, i_1, i_2, θ .

Le système d'équations est impossible à résoudre à la main. Simulink permet d'effectuer cette résolution. Il permet d'accéder directement aux grandeurs électromécaniques.

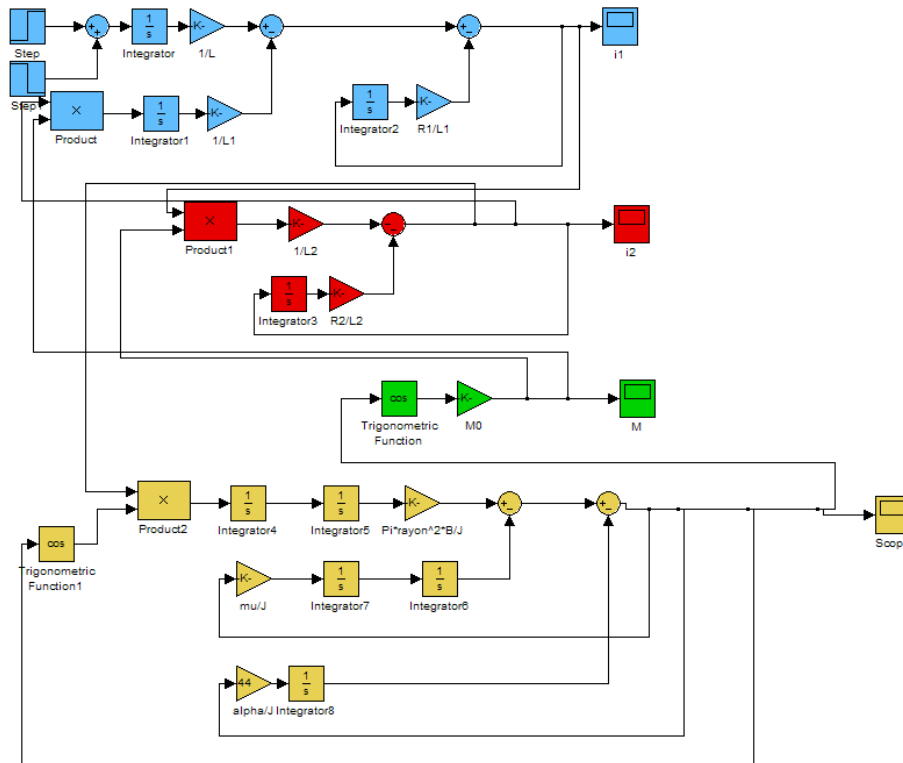


Figure 27-Schéma bloc pour la simulation de l'expérience complète

3) Résultats :

✓ Validation du modèle :

Validation de la simulation sans mouvement :

On commence par valider la simulation sans mouvement, c'est-à-dire la partie électrique de notre modèle.

Pour cela, on relève les paramètres électriques sur notre réplique à l'aide d'un impédancemètre (valeurs relevées pour $f=50$ Hz). On obtient :

$$L_1 = 4.10^{-3} H$$

$$L_2 = 6.10^{-7} H$$

$$R_1 = 5\Omega$$

$$R_2 = 1,5.10^{-3}\Omega$$

Nous n'avons pas trouvé de méthode adéquate pour accéder à la mutuelle. Nous savons juste que $M \leq \sqrt{L_1 L_2}$. Cela nous donne une idée de l'ordre de grandeur de M : environ 10^{-5} H. Nous savons que nous pourrions faire varier ce paramètre pour ajuster notre modèle.

Nous avons fait tourner la simulation sans mouvement avec ces valeurs. Voici les courbes obtenues, en prenant $M = 7,5.10^{-6}H$, et une valeur de E tension aux bornes de la bobine de 24 V.

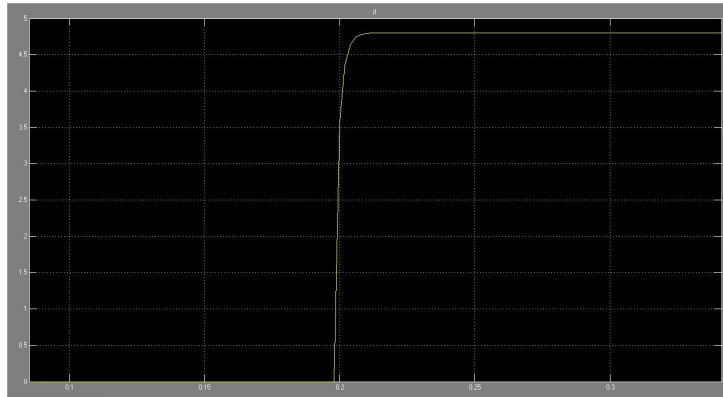


Figure 28-Evolution de i_1 au cours du temps

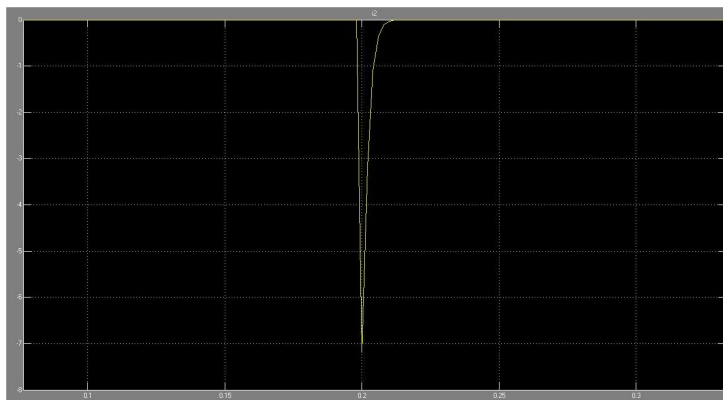


Figure 29-Evolution de i_2 au cours du temps

Ces courbes sont conformes aux prévisions. Elles ont une allure proche des courbes obtenues sur la réplique. Les valeurs numériques sont également satisfaisantes : 5A dans le circuit primaire et 7A dans l'anneau, ce qui est proche de ce qui a été relevé sur le dispositif réel.

Cette partie du modèle est donc validée.

Validation de la simulation complète :

Nous avons ensuite comparé les résultats donnés par la simulation du phénomène complet et la réplique.

Nous avons relevé sur notre dispositif les paramètres manquants :

Rayon de l'anneau : 0,1m

$$\text{Moment d'inertie : } J \approx \frac{mR^2}{2}$$

$$\text{On obtient : } J = 2,8.10^{-4} \text{ kg.m}^2$$

Champ de l'aimant : 0,15 T

Détermination d' α et de μ :

Pour déterminer ces deux paramètres, on réalise l'expérience suivante : on écarte l'anneau de sa position d'équilibre d'un angle θ_0 et on le lâche sans vitesse initiale.

$$\text{L'équation du mouvement est alors : } J \frac{d^2\theta}{dt^2} + \alpha \frac{d\theta}{dt} + \mu\theta = 0$$

La solution de cette équation peut s'écrire :

$$\theta(t) = \theta_0 e^{\frac{-\alpha}{2J}t} \left[\cos\left(\frac{\sqrt{4J\mu - \alpha^2}}{2J}t\right) + \frac{\alpha}{\sqrt{4J\mu - \alpha^2}} \sin\left(\frac{\sqrt{4J\mu - \alpha^2}}{2J}t\right) \right]$$

Expérimentalement nous pouvons observer le comportement de l'anneau, et obtenir la courbe correspondant aux variations de θ en fonction du temps.

Pour cela, on mesure l'amplitude de chaque oscillation ainsi que la durée de ces oscillations. Ces mesures sont approximatives car elles ont été faites avec des moyens rudimentaires, c'est-à-dire un rapporteur gradué tous les degrés et un chronomètre.

La courbe obtenue nous permet cependant de déterminer la période des oscillations notée T et la différence d'amplitude entre deux oscillations successives notée δ , qui vont nous permettre de trouver α et μ .

On mesure une période valant environ 4 secondes, et une différence d'amplitude de 0,17 rad.

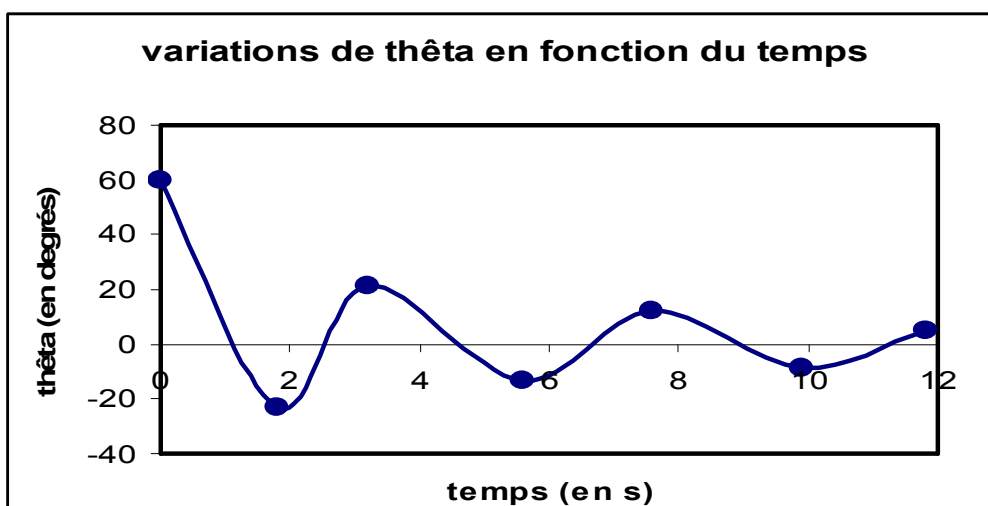


Figure 30- Variation de θ en fonction du temps (oscillations libres amorties)

A partir de ces mesures, on accède à α et μ par :

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\mu}{J} - \frac{\alpha^2}{4J^2}}} \quad \text{et} \quad \delta = \frac{\alpha}{2\mu} T$$

Or $T = 4\text{s}$

et $\delta = 0,17 \text{ rad.}$

On obtient alors deux valeurs pour μ et α :

$$\mu = 0,147 \text{ Nm}$$

$$\alpha = 0,0128 \text{ kg.m/s}$$

$$\mu = 6,94 \cdot 10^{-4} \text{ Nm}$$

$$\alpha = 6,04 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m/s}$$

Après essais de la simulation avec ces deux valeurs, une seule donne des résultats cohérents :

$\mu = 6,94 \cdot 10^{-4} \text{ Nm}$ $\alpha = 6,04 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m/s}$

Voici les courbes obtenues avec l'ensemble de ces valeurs :

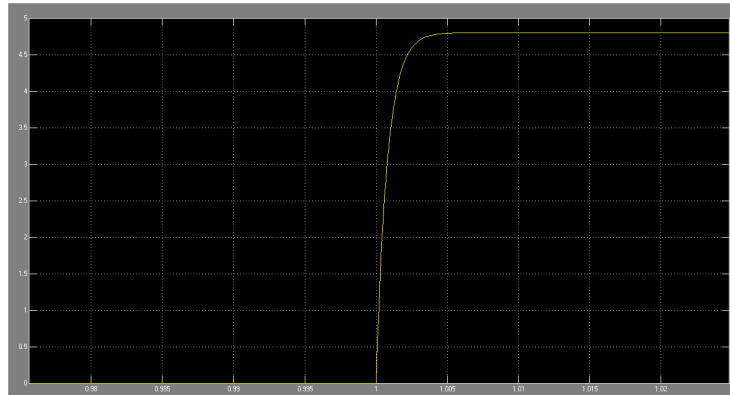


Figure 31-Evolution de i_1 au cours du temps (Simulation complète)

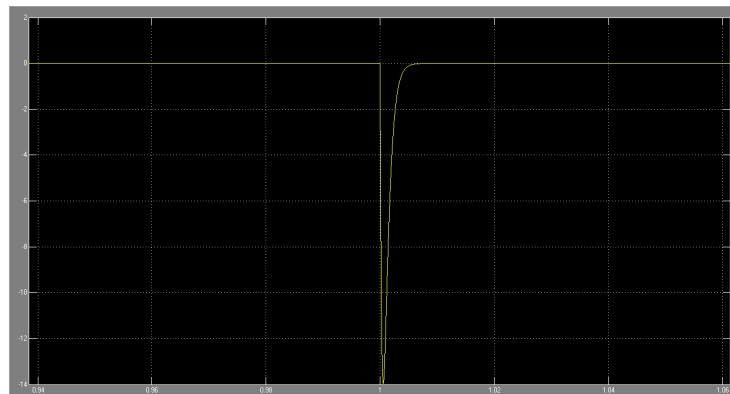


Figure 32-Evolution de i_2 au cours du temps (Simulation complète)



Figure 33-Evolution de l'angle de rotation θ au cours du temps (Simulation complète)

Ces courbes ont une allure cohérente. Les valeurs numériques sont également convenables : le courant dans le circuit primaire est de l'ordre de 5A, ce qui correspond aux observations sur la réplique ; le courant dans l'anneau est de l'ordre de 14A, ce qui est du bon ordre de grandeur même si cette valeur est un peu élevée (cette erreur provient peut-être de l'incertitude sur la valeur de M). L'angle de rotation de l'anneau le plus élevé est d'environ 15° , ce qui est également un peu élevé. Cette valeur élevée provient en fait de la valeur élevée du courant dans l'anneau. En effet la valeur du courant dans l'anneau influe fortement sur l'angle de rotation de l'anneau.

Nous avons cherché à ajuster ce modèle par rapport à la réplique. Nous avons pour cela fait varier légèrement M, α et μ autour des valeurs utilisées précédemment. (Ce sont les paramètres sur lesquels il y a le plus d'incertitude).

$$\alpha = 1,13 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m / s}$$

En prenant : $\mu = 8,49 \cdot 10^{-4} \text{ Nm}$ on obtient les courbes suivantes :

$$M_0 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

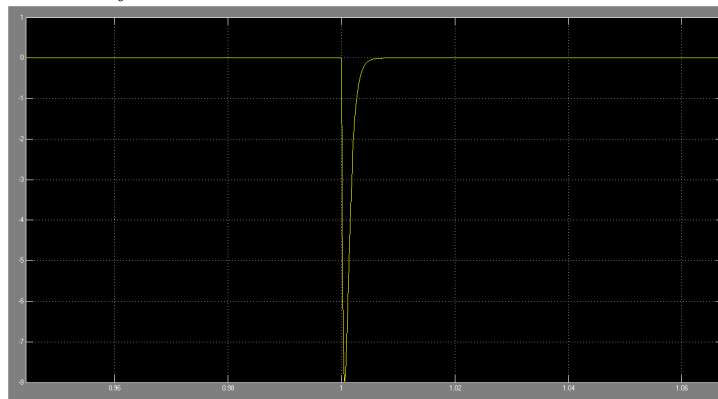


Figure 34-Evolution de i_2 au cours du temps (Modèle ajusté)

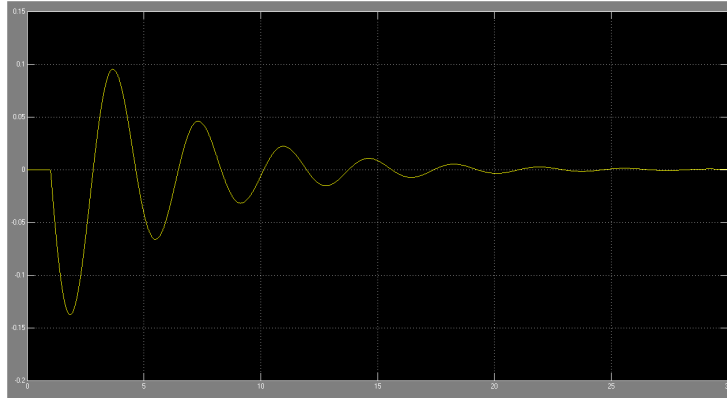


Figure 35-Evolution de l'angle de rotation θ au cours du temps (Modèle ajusté)

Le courant dans l'anneau a avec ces paramètres une valeur de 8A, ce qui est proche de ce qui a été observé sur la réplique. Les valeurs successives prises par l'angle de rotation de l'anneau sont $7,5^\circ$, 6° (première oscillation), $3,5^\circ$, $2,8^\circ$ (deuxième oscillation), $1,5^\circ$, 1° (troisième oscillation).

Ces résultats sont très proches de ceux observés avec le dispositif. Les valeurs choisies par M, α et μ sont des valeurs tout à fait possibles vu que ces grandeurs sont connues avec incertitude. Ainsi avec les valeurs de α et μ choisies on trouve $T=3,65$ s et $\delta=0,24$ rad pour l'anneau oscillant librement (à comparer avec nos valeurs $T=4$ s et $\delta=0,17$ rad.). Ces valeurs sont des valeurs acceptables vu l'imprécision des mesures.

On considère donc le modèle comme validé.

✓ Discussion autour de la simulation :

La simulation fait apparaître plusieurs paramètres qui jouent un rôle important sur les résultats de l'expérience.

- la valeur du courant i_2 influe sur la valeur de l'angle de rotation de l'anneau.
- mais ce sont surtout les paramètres mécaniques, c'est-à-dire le moment de torsion du fil μ , le coefficient d'amortissement α et le moment d'inertie qui ont une influence sur l'allure et les valeurs des résultats. Les résultats de l'expérience sont très dépendants du choix de l'anneau et du fil. Cela pourrait expliquer les résultats divergents des différentes répliques.

Vu le peu d'informations sur les conditions de l'expérience d'Ampère et des différentes répliques, il est difficile de proposer une interprétation certaine des résultats observés. Cependant, plusieurs points peuvent être avancés :

- lors de la réalisation de l'expérience, Ampère ne disposait sans doute d'une source fournissant un courant aussi important ; la rotation de l'anneau devait être faible, ce qui peut expliquer ses hésitations.
- avec des paramètres mécaniques différents de ceux de notre réplique, par exemple en augmentant le moment d'inertie de l'anneau, on obtient des oscillations d'amplitude importante qui s'amortissent lentement.

Dans ces conditions, il est exact que l'aspect transitoire du phénomène n'est plus évident. Cela pourrait confirmer les observations de Thompson, mais on ne peut affirmer avec certitude que cela correspond à ce qu'il a observé car son compte-rendu est très imprécis.

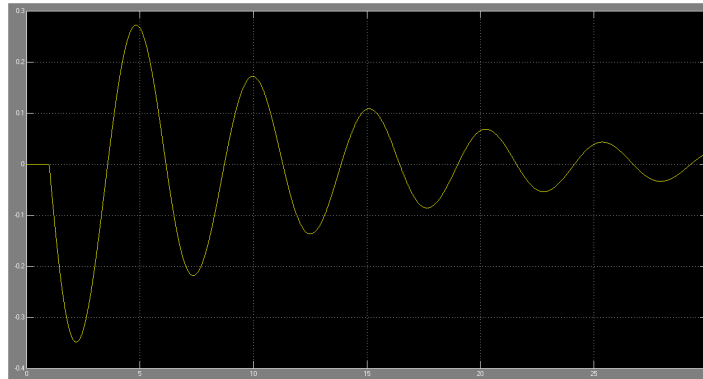


Figure 35-Evolution de l'angle de rotation θ au cours du temps pour une valeur de J augmentée

- Mendoza donne lui quelques précisions sur les paramètres mécaniques de son dispositif : sur sa réplique, $J = 6,38 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^2$ et $\mu = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ N.m}$.

Lorsqu'on calcule la période des oscillations libres non amorties de ce système, on obtient : $T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{\mu}} = 87 \text{ s}$. Il semble qu'en prenant en plus

en compte un coefficient d'amortissement, ces caractéristiques puissent être à l'origine de ses observations. Il semble malgré tout surprenant que Mendoza n'ait pas pris conscience des particularités mécaniques de son dispositif.

La simulation a donc permis de compléter l'étude de l'expérience d'Ampère en apportant plusieurs éléments nouveaux. Elle a fourni des explications possibles aux résultats obtenus par Ampère et les différentes répliques.

Chapitre 4 : Le site Web :

1) Cahier des charges :

✓ Vocation du site :

Le site web réalisé à l'issue de ce projet s'intégrera sur le site du CNRS : www.ampere.cnrs.fr. Il n'a donc pas pour vocation de dépeindre exhaustivement la vie et le travail d'Ampère, travail déjà largement fait dans le site du CNRS. Il s'agit plutôt de mettre l'accent sur l'expérience des courants d'influence en elle-même ainsi que sur notre démarche, les difficultés que nous avons rencontrées et bien sûr les résultats.

✓ Public visé :

Le cahier des charges était de présenter le travail réalisé avec deux niveaux de lectures conformément aux exigences du site Ampère pour satisfaire deux publics distincts: un public de curieux, mais aussi des scientifiques et des chercheurs. Le site Web devait par conséquent comporter :

- une partie de vulgarisation scientifique, présentant l'expérience, la replaçant dans son contexte historique, et détaillant la démarche suivie. Les commanditaires insistaient en effet pour que la page fasse ressortir le travail scientifique fait sur l'expérience.
- une partie scientifique, présentant plus en détail les phénomènes intervenant dans l'expérience, les équations posées pour réaliser la simulation, et tentant d'interpréter les résultats obtenus par Ampère et les autres répliques déjà réalisées de l'expérience.

✓ Forme :

Le site web se veut plus qu'un simple rapport sur la réplique et la simulation informatique de l'expérience d'Ampère. Il propose donc des supports divers : médias, photos, animations, permettant à chacun de visualiser le dispositif expérimental, les courbes de résultats ou les schémas explicatifs de manière claire et concrète.

2) Choix de la mise en forme :

A la vue du large public visé par le site et afin de répondre au cahier des charges, il a été décidé de laisser la plus grande liberté possible au visiteur. En effet, un scientifique aguerri ne s'attardera pas sur le concept d'induction électromagnétique, qu'il connaît déjà, alors que le visiteur profane aura besoin de comprendre les notions scientifiques essentielles, mais ne s'intéressera pas à tout l'aspect mathématique de la réplique (équations, dérivées etc). De manière générale, chacun doit pouvoir visiter à sa guise les sections qui l'intéressent.

Il a ainsi été choisi de réaliser un menu, sorte de plan de site, toujours visible par le visiteur. Ce menu récapitule les différentes pages accessibles.

Chaque case constitue un hyperlien qui amène directement sur la page concernée sans avoir besoin de passer par des étapes superflues.

Retour à l'accueil	<h2>L'expérience des courants d'influence</h2>
ELEMENTS SCIENTIFIQUES ET HISTORIQUES	
André-Marie Ampère	L'expérience des courants d'influence a été imaginée et réalisée à deux reprises (1821 et 1822) par André-Marie Ampère . Elle met en jeu un phénomène inconnu à l'époque, le phénomène d'induction électromagnétique , qu'Ampère a entrevu sans toutefois parvenir à l'expliquer, l'interprétation ayant été faite par Faraday en 1831. Cette expérience est donc très intéressante du point de vue de l'histoire des sciences. Elle montre par bien des aspects la difficulté de la recherche scientifique.
Michael Faraday	Elèves-ingénieurs de l'Ecole Centrale de Lyon, nous nous sommes penchés sur cette expérience. Afin de mieux la comprendre, nous l'avons répliquée et simulée sur ordinateur. Ce site présente le résultat de notre travail (Présentation de notre travail).
Contexte historique	
Expérience par Ampère	
Interprétation de l'expérience par Ampère	
Interprétation moderne de l'expérience	
NOTRE REPLICATION	
Intérêt de la réplcation	
Les autres réplcations	
Nos résultats	
NOTRE SIMULATION	
Intérêt de la simulation	
Modélisation	
Résultats	
ELEMENTS DE PHYSIQUE	
Qu'est-ce que l'induction?	

Figure 36-Page d'accueil de notre site

En outre, il est prévu une navigation facile entre les différentes pages du site au moyen d'hyperliens. Notamment, dès que des rappels théoriques sont nécessaires, un hyperlien permet au lecteur de se reporter à la section physique. Des liens existent également vers le site Ampère du CNRS ainsi que vers le site du musée Ampère.

Enfin, nous avons essayé d'intégrer un maximum de supports visuels : photos, images gif, schémas, films qui seront mis sur le site par l'équipe du CNRS.

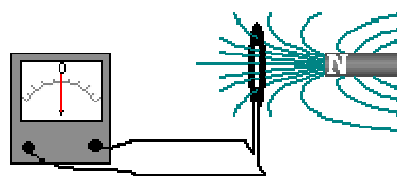


Figure 37-Animation gif sur notre site

3) Les différentes sections du site :

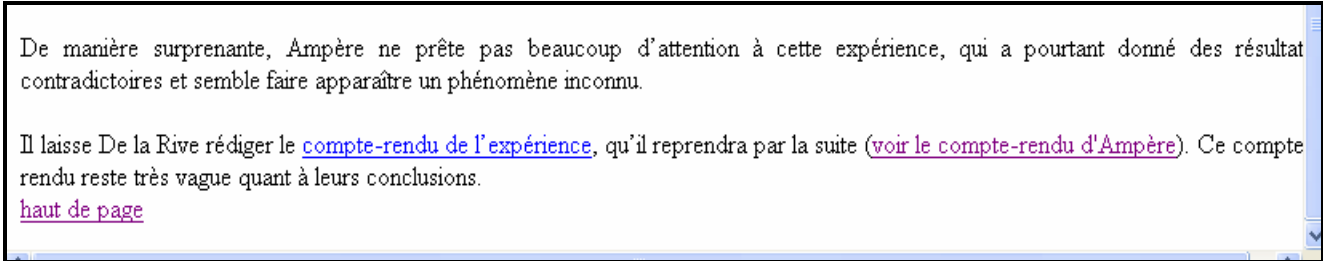
Le site s'articule autour de 4 grands axes : éléments scientifiques et historiques, réplcation, simulation et éléments théoriques de physique moderne.

De cette manière, le visiteur bénéficie à la fois de connaissances générales et d'une approche détaillée de notre travail personnel.

✓ [Eléments scientifiques et historiques :](#)

Dans cette section, on fournit au visiteur des éléments de compréhension sur la science au XIX^{ème} siècle : mise au point sur Ampère et Faraday et introduction sur le contexte historique rédigée par Mme Blondel. Les biographies sont succinctes, en particulier celle d'Ampère, dont la vie est déjà détaillée sur le site du CNRS. Elles sont plus destinées à dessiner les grandes lignes de la vie des savants.

Surtout, cette section présente l'expérience d'Ampère. Afin de fournir tous les éléments de compréhension au visiteur, on a placé au début de la page un film de l'appareil. Ce film montre le dispositif et une démonstration de l'expérience. Il est accompagné d'un commentaire audio sur le dispositif et est associé à une description du dispositif par Ampère, accessible via un hyperlien. On explique ensuite les deux réalisations successives de l'expérience et les théories qu'Ampère essayait de démontrer. Afin de décrire le plus fidèlement possible la démarche d'Ampère, des extraits des comptes-rendus d'Ampère et de De la Rive sont proposés au visiteur.



De manière surprenante, Ampère ne prête pas beaucoup d'attention à cette expérience, qui a pourtant donné des résultats contradictoires et semble faire apparaître un phénomène inconnu.

Il laisse De la Rive rédiger le [compte-rendu de l'expérience](#), qu'il reprendra par la suite ([voir le compte-rendu d'Ampère](#)). Ce compte rendu reste très vague quant à leurs conclusions.

[haut de page](#)

Figure 38-Hyperliens vers des textes d'époque

Enfin, une page est également consacrée à l'interprétation moderne de l'expérience. Elle tente d'expliquer le phénomène observé dans l'introduction à l'aide de la théorie de l'induction de Faraday et constitue une introduction à notre travail, donc aux deux sections suivantes.

✓ [Réplication](#)

La section réplique explique l'intérêt, la démarche et les résultats de notre réplique.

L'intérêt de la réplique est développé sur une première page qui met en évidence les avantages d'une telle reproduction dans la démarche d'historien des sciences. Cette page est essentiellement constituée d'un témoignage vidéo d'un membre de l'équipe, qui explique ce que notre réplique nous a apporté dans la compréhension de l'expérience.

La deuxième page de la section complète la page sur l'intérêt de la réplique en présentant les différentes répliques de l'expérience des courants d'influence. Cette page met en lumière des points à préciser dans les résultats de l'expérience et démontre ainsi l'utilité de notre réplique.

Nos résultats sont présentés dans une dernière page. Cette page propose une comparaison entre notre réplique finale et la gravure d'Ampère ainsi qu'un commentaire sur ce que montre notre réalisation de l'expérience. Dans la partie comparant notre réplique et la gravure d'Ampère, le visiteur peut obtenir des

précisions sur notre réplique en cliquant sur l'élément concerné sur la liste située sur la même page.

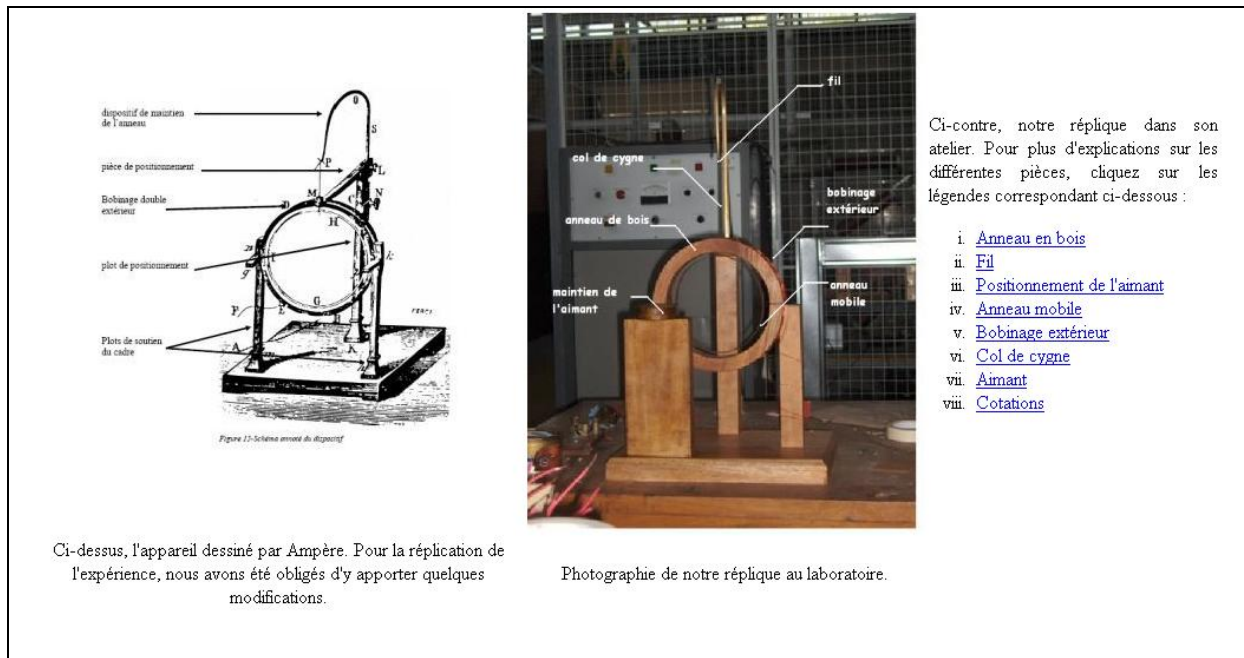


Figure 39-Comparaison de la gravure d'Ampère et de notre dispositif

✓ [Simulation :](#)

La section simulation explique l'intérêt, la démarche et les résultats de notre simulation.

La page sur la modélisation est assez difficile à mettre en œuvre dans la mesure où il y a des calculs relativement compliqués et fastidieux. Nous avons choisi de d'abord présenter la démarche, puis de laisser à l'internaute le choix de visualiser ou non les aspects plus scientifiques de la modélisation selon ses attentes.

<p>Retour à l'accueil</p> <p>ELEMENTS SCIENTIFIQUES ET HISTORIQUES</p> <p>André-Marie Ampère</p> <p>Michael Faraday</p> <p>Contexte historique</p> <p>Expérience par Ampère</p> <p>Interprétation de l'expérience par Ampère</p> <p>Interprétation moderne de l'expérience</p> <p>NOTRE REPLICATION</p> <p>Intérêt de la réplique</p> <p>Les autres répliques</p> <p>Nos résultats</p> <p>NOTRE SIMULATION</p> <p>Intérêt de la simulation</p> <p>Modélisation</p> <p>Résultats</p> <p>ELEMENTS DE PHYSIQUE</p> <p>Qu'est-ce que l'induction?</p>	<h2>L'expérience des courants d'influence</h2> <h3>Démarche utilisée pour la simulation</h3> <p>Il est intéressant d'effectuer une simulation informatique de l'expérience d'Ampère, entre autres pour pouvoir changer les différents paramètres très facilement. Pour ce, on peut utiliser le logiciel Matlab et plus précisément la partie Simulink. L'utilisation de Simulink implique le choix d'un modèle qui représente les phénomènes électriques et mécaniques mis en jeu. Après seulement, il est possible d'écrire les équations et d'entrer des valeurs pour les différents paramètres (inductances, résistances...). Nous avons fait le choix d'effectuer la simulation en plusieurs étapes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dans un <i>premier temps</i>, nous avons fait une simulation qui ne tient pas compte du mouvement relatif de l'anneau par rapport à la bobine, car ce mouvement a lui-même une influence sur le phénomène d'induction et complique donc la modélisation. • Dans un <i>second temps</i>, nous avons raffiné le modèle en tenant compte du mouvement. <p>Le modèle, par définition, n'est pas parfait : par exemple, le champ magnétique créé par l'aimant n'est pas vraiment constant dans l'entrefer. Dans l'idéal, il faudrait le cartographier. Il s'agit d'une approximation, sur laquelle nous pourrions revenir si les résultats ne sont pas satisfaisants. Cela signifie qu'il faudra procéder à une validation du modèle.</p> <h3>Modélisation</h3> <p>Cliquez ici pour avoir accès à la modélisation du circuit (connaissances de base en électricité nécessaires).</p>
---	--

Figure 40-Page consacrée à la simulation circuit

A partir du schéma électrique du circuit, on peut accéder aux équations avec ou sans mouvement. Les calculs sont présentés succinctement dans des pages accessibles grâce à des hyperliens, agrémentés de schémas pour rendre la compréhension plus simple. En particulier, pour la simulation avec mouvement, une explication qualitative est donnée avant développement des calculs.

- [Explication des phénomènes mis en jeu](#)
- [Equations](#)

Explication des phénomènes mis en jeu

Cette fois-ci, on tient compte du mouvement de l'anneau mobile, et donc de l'aspect mécanique du problème. Désormais, l'inductance mutuelle est variable au cours du temps et il faut introduire de nouveaux paramètres :

- le moment de torsion du fil qui sert à tenir l'anneau mobile
- le moment d'inertie de l'anneau mobile.

Sans l'aimant, l'anneau reste immobile (les forces de Laplace créées par i_1 et par i_2 s'annulent : on peut voir sur le schéma que, pour deux points diamétralement opposés, l'effort résultant est nul).

force de Laplace :

$$\vec{dF} = i \vec{dl} \times \vec{B}$$

Figure 41-Explication des phénomènes mis en jeu

Une dernière page présente nos commentaires sur les résultats, en présentant les courbes obtenues pour une série de paramètres. *(Cette page est en cours de réalisation au moment de l'écriture de ce rapport).*

✓ Éléments de physique moderne :

L'objectif de cette section est d'introduire le lecteur grand public aux bases de physique moderne nécessaires à la compréhension de l'expérience d'Ampère. On y introduit ainsi l'induction de manière qualitative, grâce à un petit schéma animé et à une expérience de Faraday, puis on se penche sur la loi de Lenz, la loi de Faraday et la force de Laplace.

Dans ce site web, nous avons tenté de souligner au maximum les subtilités et la complexité de la reproduction de l'expérience d'Ampère, tout en restant à la fois compréhensibles et clairs pour le grand public, et concis pour le public scientifique. C'est une tâche qui s'est avérée complexe et qui requiert une maîtrise certaine de la communication et de la pédagogie.

Conclusion sur la partie scientifique:

L'expérience des courants d'influence est donc une expérience historique particulièrement intrigante. Elle a posé problème à Ampère, qui n'est pas parvenu à l'interpréter complètement, et les différents scientifiques qui l'ont répliquée se sont beaucoup interrogés sur ses résultats.

La nouvelle réplique accompagnée de la simulation circuit a permis de répondre à plusieurs questions laissées en suspens par les différents textes qui évoquent cette expérience. La simulation circuit a notamment mis en évidence l'influence importante des paramètres mécaniques de l'ensemble formé par l'anneau et le fil auquel est suspendu. Les résultats de l'expérience peuvent beaucoup varier en fonction de ces paramètres.

L'ensemble de ce travail et ces résultats ont été mis en forme sur un site Web qui sera bientôt intégré au site Ampère.

PARTIE 2 : ANALYSE
DU PROCESSUS DE
PROJET :

Outre son intérêt scientifique, ce projet avait aussi pour objectif de nous apprendre à travailler en groupe, et ainsi de nous préparer notamment au travail en groupe de projet, très courant dans le monde de l'entreprise. Ce rapport est donc également l'occasion pour nous de tirer des conclusions de cette expérience.

I) L'organisation de l'équipe :

1) La formation de l'équipe :

Au début de l'année scolaire 2004-2005, il nous a été proposé par l'Ecole Centrale de Lyon de travailler sur un projet par groupes de 5 personnes. Une journée de présentation des différents projets d'étude a eu lieu, nous permettant de saisir l'importance de faire un choix réfléchi quant au sujet sur lequel nous allions travailler, et aux personnes avec qui nous allions collaborer.

Ne connaissant pas particulièrement les différents élèves de notre promotion à cette époque, nous avons tous les cinq choisi de privilégier l'intérêt du sujet.

Notre choix s'est porté sur ce projet pour deux raisons principales:

- L'intérêt que nous portons à l'histoire des sciences : il nous semblait extrêmement intéressant de chercher à comprendre les difficultés de la recherche scientifique à travers un exemple historique.
- Nous avons tous envie de mettre nos connaissances au service des autres, et ce projet, de par son aspect très pédagogique, nous a attirés en ce sens.

Ainsi, après une première rencontre, nous nous sommes réunis avec les tuteurs du projet Ampère pour finaliser la formation de l'équipe.

Figure 42-L'équipe



Jérémie Auer :

Notre trésorier et responsable de la réplique.
Attiré par l'aspect pédagogique et le travail de recherche du projet.

Eric Baudon :

Responsable avec Jérémie de la réalisation des expériences.
Passionné par la physique, est très attiré par l'aspect réplique de l'expérience.



Isabelle Gile :

Webmaster de talent, elle s'est plus particulièrement occupée du site de communication et de la simulation.

Attirée par le projet à la fois pour son aspect pédagogique et pour l'aspect réalisation d'un site Internet.

Barbara Peel :

Travaille sur la simulation sous Matlab avec Isabelle.
Plus particulièrement attirée par l'aspect pédagogique du projet (envisage de devenir prof de maths...)

**Valérie Seguin :**

Notre chef de projet ! Est également responsable de la communication, au sein de l'équipe et avec les intervenants extérieurs. Avait déjà réalisé en première année de prépa un TIPE (Travail Personnel d'Initiative Encadrée) sur Fourier. Très intéressée par l'aspect histoire des sciences du projet.

2) La répartition des tâches :

Les débuts n'ont pas toujours été faciles... En effet, il était nouveau pour nous de travailler en équipe, et face à la quantité de travail qui nous attendait nous ne savions pas trop par quoi commencer. Nous avons vite réalisé qu'une équipe ne pouvait fonctionner sans rôles précis, car dans ce cas tout le monde doit tout faire et finalement il s'avère que personne n'a rien fait !

Valérie s'est naturellement imposée en tant que directrice des opérations, répartissant les tâches entre les différents membres de l'équipe. C'est pourquoi, au moment où nous avons dû fixer des tâches bien précises pour chacun, nous l'avons désignée à l'unanimité chef de projet. Elle est également chargée de la communication au sein du groupe et avec les tuteurs et les intervenants extérieurs, aidée en cela par Isabelle qui s'est occupée de la réalisation d'un site Internet sur le serveur des projets de l'Ecole Centrale qui nous a permis de communiquer plus facilement entre nous et avec nos tuteurs. Jérémie a également été nommé trésorier pour vérifier l'évolution de notre budget.

Pour le travail scientifique, nous avons réparti le groupe entre nos deux thèmes de travail principaux : la réplication de l'expérience et la simulation informatique.

3) Le fonctionnement de l'équipe :

Nous nous sommes retrouvés tous les mercredis matins jusqu'au mois de juin 2005 puis tous les mardis matins à partir du mois de septembre afin d'avancer le projet, parfois d'autres jours lorsque le besoin s'en est fait sentir. La plupart du temps, nous nous réunissons par groupe de travail (groupe réplication et groupe simulation), mais la coopération est bien sûr restée constante entre les deux groupes.

Chacun devait se tenir informé du travail des autres par l'intermédiaire de mails ou de notre site de projet sur le serveur de l'école, mais il s'est souvent avéré plus efficace d'organiser une réunion de l'ensemble du groupe. Ce projet nous a en effet rappelé que les messages passaient beaucoup mieux par la communication directe, les personnes se sentant naturellement plus impliquées.

Nous avons rédigé des comptes-rendus de chacune de nos réunions avec les tuteurs de notre projet et/ou nos commanditaires et de certaines de nos réunions à l'intérieur de nos groupes de travail respectifs. Ce travail nous a parfois semblé contraignant, mais nous avons en fait regretté de ne pas avoir été plus systématiques dans la rédaction des comptes-rendus de nos séances de travail, car nous avons parfois été obligés de revenir sur un travail déjà effectué, faute de trace écrite.

II) Le déroulement du projet :

1) Les grandes étapes de notre projet :

✓ 1^{ère} étape : Recherches bibliographiques

Comme dans tout travail de recherche, nous avons dû commencer par des recherches bibliographiques, bien aidés par Madame Carvallo, notre tutrice de projet et Madame Blondel, notre commanditaire.

Il nous a fallu lire une grande quantité de documents et les résumer afin de pouvoir les exploiter par la suite. Cela nous a pris un certain temps, étant donné qu'une partie des documents était en anglais et que nous ne maîtrisons pas tous parfaitement cette langue. De plus, il nous avait été demandé de respecter le vocabulaire d'époque dans la rédaction de nos résumés, ce qui nous a posé de grandes difficultés car il est toujours plus aisé de s'aider des connaissances actuelles pour décrire un phénomène ancien...

Après trois mois de recherches bibliographiques, notre travail commençait à être moins efficace, et nous avons alors choisi, d'un commun accord, de commencer la réplication et la simulation, afin de nous sentir à nouveau réellement impliqués dans notre projet et de tenter de lever les zones d'ombre apparues avec la lecture des articles.

✓ 2^{ème} étape : Réplication et simulation

Nous avons alors débuté la réplication de l'expérience et la simulation. Nous nous sommes « divisés » en deux groupes afin de travailler plus rapidement et plus efficacement.

Eric et JérémY se sont donc concentrés sur la construction de la réplique de l'expérience, tandis que Barbara, Isabelle et Valérie se sont occupées de la simulation sous Matlab des phénomènes mis en jeu. En effet nous voulions comparer les résultats expérimentaux à des résultats théoriques obtenus à l'aide des outils techniques actuels.

Cette répartition s'est avérée efficace car elle correspondait bien à nos caractères et à nos méthodes de travail.

✓ 3^{ème} étape : Finalisation du projet :

A partir du mois de septembre, nous avons dû nous montrer plus flexibles pour parvenir à remplir nos différents objectifs : finalisation et exploitation de la réplication et de la simulation, réalisation de la page Web pour le site Ampère, participation à la Fête de la Science au mois d'octobre 2005.

Eric et JérémY ont ainsi achevé leur travail sur la réplication et ont réalisé les ajustements nécessaires pour qu'elle puisse être présentée au grand public au cours de la Fête de la Science.

Après plusieurs réunions de réflexion collective, Isabelle, qui avait suivi en juin 2005 un module d'approfondissement « Technologies du Web », s'est chargée de la réalisation de la page Web pour le site Ampère.

Valérie quant à elle s'est chargée de la réalisation des affiches pour la Fête de la Science, puis a assisté Barbara dans son travail d'exploitation de la simulation.



Figure 43-Affiche réalisée pour la Fête de la Science

2) Evolution de nos objectifs :

Au début de ce projet, nous nous étions fixés plusieurs objectifs : réalisation d'une réplique et d'une simulation de l'expérience des courants d'influence, présentation de ce travail sur le site Ampère.

Après 16 mois de travail, il apparaît que ces différents objectifs ont été remplis, même si au cours du projet il y a bien sûr dû y avoir des ajustements. La simulation circuit notamment a pris plus de temps que prévu ; nous avions pendant un temps espéré pouvoir utiliser cette simulation pour réaliser une simulation 3D, mais cela n'a pas été possible faute de temps.

Nous avons également dû intégrer de nouveaux objectifs au cours du projet, comme notre participation à la Fête de la Science au mois d'octobre 2005, participation qui a été décidée relativement tard.

3) Les différents intervenants extérieurs :

Le déroulement de notre projet a été marqué par les conseils précieux d'intervenants extérieurs, qui nous ont guidés durant ce projet. Nous tenons encore une fois à remercier tous ceux qui nous ont donné la possibilité d'avancer dans nos travaux, et d'appréhender la réalité du travail en équipe. Nos relations avec les différents intervenants de ce projet ont été d'autant plus enrichissantes qu'elles ont été variées.

Nous avons ainsi rencontré des membres de la Société des Amis d'Ampère qui nous ont parlé d'Ampère avec une grande passion, n'hésitant pas à nous dépanner quand nous en avons eu besoin. Nous avons également eu la chance de trouver à l'atelier des personnes accueillantes et à l'écoute de nos besoins sans qui nous n'aurions pas pu mener à bien la réplique de l'expérience. Le fait de devoir manipuler des outils comme Matlab pour la simulation nous a incités à progresser dans la maîtrise de ce logiciel, et à nous renseigner auprès des personnes compétentes.

Nous avons donc eu la chance grâce à ces personnes issues de milieux très divers de connaître de nombreux aspects de la conduite d'un projet comme celui-ci, du sciage d'une planche à la programmation d'un site Internet, en passant par l'histoire des sciences racontée par des passionnés !

Notre commanditaire, Madame Blondel a également été très présente, elle s'est tenue informée de l'avancée de nos travaux à l'aide de notre site de projet à l'Ecole Centrale. Nous l'avons rencontrée à plusieurs reprises avec Stéphane Pouyllau, qui travaille auprès d'elle en tant qu'informaticien. Ces réunions ont été l'occasion de faire le point sur notre travail et de nous orienter vers de nouvelles pistes.

III) Les apports de ce projet:

Ce projet ne s'inscrit pour aucun d'entre nous dans un projet professionnel précis, mais il nous a apporté de nombreux enseignements qui nous seront utiles dans l'avenir.

1) Apports scientifiques et culturels :

Au-delà des apports techniques évidents comme le développement de nos connaissances en Simulink ou l'apprentissage de la réalisation d'un site Web, ce projet a surtout été pour nous l'occasion d'étudier un problème scientifique dont la solution n'était pas connue à l'avance.

Nous avons été confrontés aux tâtonnements de la recherche scientifique, et ainsi nous avons eu un aperçu de la difficulté de la démarche du chercheur. Un bel exemple a été donné lors de l'une des réunions avec nos commanditaires. Nous avons lors de cette réunion réalisé pour la première fois l'expérience d'Ampère avec notre réplique. Nous avons alors utilisé un aimant droit que nous tenions à la main ; au cours de la réalisation de l'expérience, nous avons ressenti une force importante s'exerçant sur l'aimant. Nous nous sommes pendant de longues minutes interrogés sur cette force étonnés qu'une telle force puisse être créée par le courant dans l'anneau ...sans penser que le courant dans la bobine pouvait également jouer un rôle !

Ce projet a été également l'occasion de découvrir une nouvelle discipline, l'histoire des sciences.

Ce projet nous a donc amenés à envisager la science d'un autre point de vue, non plus celui de ses résultats mais celui de sa construction.

2) Travail de pédagogie :

Ce projet nous a aussi amenés à développer nos qualités de pédagogues, avec la réalisation du site Web consacré à l'expérience d'Ampère et notre participation à la Fête des Sciences.

Lors de la Fête de la Science, nous avons en particulier été confrontés à la difficulté de nous adapter aux différents publics (du simple curieux au scientifique averti). Nous avons eu beaucoup de mal à faire passer notre message aux premières personnes à qui nous avons présenté l'expérience, puis nous nous sommes « aguerris » au fil des rencontres. Cette expérience nous a beaucoup appris, et nous a guidés lors de la réalisation du site Web.

3) Apports en gestion de projet :

Cette expérience de travail en groupe de projets a été enrichissante. Notre équipe a bien fonctionné, bien que nous ayons tous les cinq des caractères différents et que nous nous côtoyons assez peu en dehors du projet. Nous avons appris à apprécier les qualités et les savoirs de chacun.

Il y a bien sûr eu des moments plus faciles que d'autres, nous avons parfois été plus ou moins motivés ou pas toujours très compréhensifs. Il n'est pas toujours évident de trouver la réponse la plus appropriée à ces situations « de crise ». Par exemple, que doit faire un des membres quand il n'est pas satisfait des décisions et du travail du groupe et qu'il ne parvient pas à se faire entendre ? Doit-il hausser le ton, au risque de compromettre la bonne ambiance au sein de l'équipe ? De même, lorsqu'un des membres refuse de faire son travail dans les temps, il n'est pas toujours évident de trouver les bons mots pour le responsabiliser. Nous n'avons pas trouvé de solution idéale à ces problèmes, mais nous avons réussi au final à les régler, souvent grâce à la solidarité au sein de l'équipe.

Cette expérience nous sera sans aucun doute profitable pour notre vie professionnelle. Nous risquons en effet d'être confrontés au même genre de problèmes dans le futur : que faire par exemple lorsqu'au cours d'un projet, un membre de l'équipe proche de la retraite refuse de collaborer sous prétexte qu'il n'est plus possible de faire pression sur lui ? Ce n'est qu'avec l'expérience que nous pouvons apprendre à gérer ces situations délicates.

Cette expérience de travail en groupe de projet nous a donc été très profitable et nous sommes tous conscients de l'impact qu'elle a eu dans notre évolution personnelle.

Conclusion :

Au début de ce projet, notre objectif était donc d'étudier une expérience d'Ampère à l'aide non seulement d'une étude historique traditionnelle mais surtout d'une réplique et d'une simulation numérique qui avaient pour but d'éclairer cette expérience. Ce travail devait ensuite être présenté sur une page Web intégrée au site Ampère.

Après 16 mois de travail, le bilan est le suivant:

- une réplique a été réalisée ; même si sur certains points nous avons dû nous limiter à une reproduction approchante, elle est opérationnelle et nous a permis de réaliser l'expérience d'Ampère.
- une simulation circuit de l'expérience a été mise au point ; elle donne des résultats cohérents, et nous a permis de commenter les différentes interprétations de l'expérience d'Ampère. Nous avons pensé réaliser une simulation 3D à partir de cette simulation, mais ce projet a été abandonné.
- une maquette du site Web est en ligne ; elle rend compte des principaux points de notre travail ; sa mise en forme est imparfaite (nous avons préféré nous concentrer sur le fond), nos commanditaires pourront procéder aux changements qu'ils souhaitent.

Nos principaux objectifs ont donc été remplis, nous espérons que nos commanditaires seront satisfaits de notre travail.

Nous tirons de notre côté un bilan très positif de ce projet, qui nous a beaucoup appris tant du point de vue scientifique que du point de vue du travail en équipe.

ANNEXES :

• Annexe 1:

Pour compléter le premier point consacré à la présentation de l'expérience, voici plusieurs documents où Ampère évoque ses deux réalisations de l'expérience des courants d'influence.

1) Réponse à une lettre de M. Van Beck sur une nouvelle expérience électromagnétique : (Octobre 1821)

Ampère y évoque sa première réalisation de l'expérience, le dispositif utilisé, ses convictions lors de cette réalisation et son interprétation de l'expérience.

Ce que cette expérience prouve directement, c'est que la proximité d'un courant électrique n'en excite point, par influence, dans un circuit métallique de cuivre, même dans les circonstances les plus favorables à cette influence. Voici l'expérience que je fis alors pour m'en assurer : je formai avec un long fil de cuivre A B C D E F [fig. 1], revêtu d'un ruban,

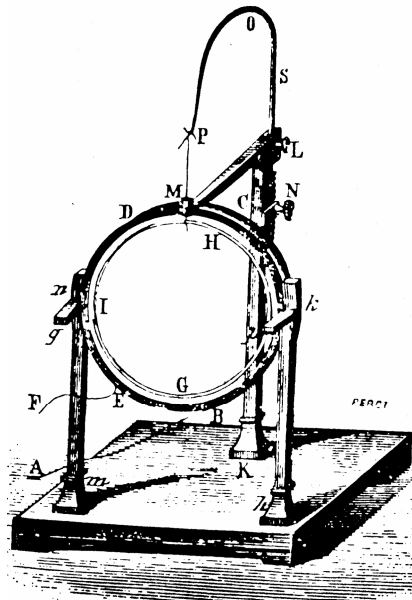


Figure 44-Schéma du dispositif dans la lettre d'Ampère à Van Beck

une spirale B C D E dont les tours étaient séparés les uns des autres par la soie de ce ruban; je disposai cette spirale, comme on le voit dans la fig. 1, sur le pied en bois *h k m n*; les deux extrémités A et F de ce fil communiquaient avec celles de la pile de douze triades d'un pied carré, dont je me suis servi pour la plupart de mes expériences. La partie supérieure de cette spirale était traversée par un petit tube de verre M, passant entre les spires qui se trouvaient les unes en avant et les autres en arrière de ce tube ; un fil métallique très fin le traversait sans en toucher les parois intérieures; il était attaché par un bout à la potence K S O P, qu'on faisait monter ou descendre à volonté en tournant le bouton N, et qu'on arrêtait à la hauteur convenable en serrant la vis de pression L ; le cercle mobile G H I était suspendu au bout de ce fil, de manière à être concentrique à la spirale, situé dans le même plan, et très près des spires dont elle se composait. Le pied *h k*

m n portait en outre deux petites règles *k p*, *nq*, sur lesquelles on pouvait appuyer les aimants qui devaient agir sur le cercle mobile. Cette disposition m'a paru la plus convenable pour exciter dans ce cercle des courants électriques par influence, si cela était possible ; mais en le présentant à l'action d'un fort aimant, je n'ai pas aperçu qu'il prit aucun mouvement, malgré la grande mobilité de ce genre de suspension."

2) Article d'Auguste De La Rive, publié dans les Annales de Chimie et de Physique en 1822, repris par Ampère dans son « Recueil d'Observations Electrodynamiques » (1822) :

Auguste De La Rive (1801-1873) est un physicien suisse, professeur de physique à l'Académie de Genève. Il a travaillé à Paris, Londres et Genève. Il s'est notamment intéressé à la chaleur spécifique des gaz.

C'est avec De La Rive qu'Ampère réalise une seconde fois l'expérience des courants d'influence. De La Rive en réalise ici un compte-rendu, qui sera repris par la suite par Ampère. Ce compte-rendu reste très vague sur leur interprétation des résultats.

La seconde expérience consiste dans l'influence qu'éprouve une lame de cuivre pliée en cercle de la part d'une ceinture de forts courants électriques au milieu desquels elle est suspendue, et qui l'entourent sans la toucher. Cette influence, que M. Ampère avait d'abord crue nulle, a été, à Genève, constatée par lui-même d'une manière très précise. En présentant à un côté de cette lame un aimant en fer à cheval, très fort, on l'a vu tantôt s'avancer entre les deux branches de l'aimant, tantôt au contraire en être repoussé, suivant le sens du courant, dans les conducteurs environnants. Cette expérience importante montre donc que les corps qui ne sont pas susceptibles, au moyen de l'influence des courants électriques, d'acquérir une aimantation permanente, comme le sont le fer et l'acier, peuvent du moins acquérir une sorte d'aimantation passagère pendant qu'ils sont sous cette influence.

3) Ampère, Notice sur quelques expériences nouvelles relative à l'action mutuelle, rédigée en 1822, publiée en 1885 dans la Collection de mémoires relatifs à la physique, tome II, Mémoires sur l'électrodynamique.

Voici une seconde version du compte-rendu de la seconde réalisation de l'expérience rédigée par Ampère lui-même

La troisième expérience avait pour objet de savoir si l'on peut produire un courant électrique par l'influence d'un autre courant. Il y a plus d'un an que je l'avais tentée, sans succès, avec l'appareil représenté [fig. 1] ; mais j'ai réussi avec un appareil absolument semblable, en employant l'excellent aimant en fer à cheval du musée de Genève, que m'avait procuré M. le professeur Pictet. Voici la description de cette expérience.[...] Le circuit fermé placé sous l'influence du courant électrique dédoublé, mais sans aucune communication avec lui, a été attiré et repoussé alternativement par l'aimant, et cette expérience ne laisserait, par conséquent, aucun doute sur la production des courants électriques par influence, si l'on ne pouvait soupçonner la présence d'un peu de fer dans le cuivre dont a été formé le circuit mobile. Il n'y avait cependant aucune action entre ce circuit et l'aimant avant que le courant électrique parcourût la spirale dont il était entouré ; c'est pourquoi je regarde cette expérience comme suffisante pour prouver cette production ; je me propose, néanmoins, pour prévenir toute objection, de la répéter incessamment, avec un circuit formé d'un métal non magnétique très pur. Ce fait de la production de courants électriques par influence, très intéressant par lui-même, est d'ailleurs indépendant de la théorie générale de l'action électrodynamique.

• Annexe 2 :

Voici des extraits de l'article d'Eric Mendoza dans lequel ce dernier évoque sa réplique de l'expérience d'Ampère :

Ce premier extrait présente l'argument le plus intrigant de Mendoza : la déviation de l'anneau resterait constante tout le temps où le courant est maintenu dans la bobine.

The mobile part whose deflection indicates the secondary current turns as soon as the primary current is switched on, takes up a more-or-less constant deflection all the time the primary current continues and then when the primary current is switched off the deflection returns to zero. This mode of action is so unexpected that physicists who observe it today exhibit a variety of reactions expressing disbelief, rarely of comprehension that the instrument behaves like an overdamped, ballistic galvanometer.

Ce deuxième extrait présente (malheureusement de manière incomplète) le dispositif utilisé par Mendoza, ainsi que les résultats expérimentaux qu'il a obtenus :

In my apparatus there are 20 turns on the primary; it can be connected directly to a 12 V car battery. The field of the magnet is 0.13 T, the integrated value of BI is about 9×10^{-3} T m. The suspension is a fine copper wire 17 cm long and of diameter $0.006 \text{ cm} \pm 10\%$. The moment of inertia of the mobile circle is 638 g cm^2 , its diameter 24.5 cm. From the time of free swing the torsion constant of the wire is calculated to be $3.30 \text{ dyn cm rad}^{-1}$. The dissipation term R was measured by placing the magnet in position, deflecting the circle through a few degrees and watching the slow return to zero. The characteristic time for θ to decrease by a factor e is 150 s: thus $Ria. = 150$ s. From these. $R^2/4\mu I$ is calculated to be 29. R is in reasonable agreement with that calculated from the field and the resistance. For these and later measurements an anachronistic mirror was stuck to the ring and readings were taken with a lamp and scale.

When Ampère's experiment was repeated with a primary current of 9.5 A. the scale reading deflected through 228 mm (angle of deflection $13^\circ 1'$ decreasing to 180 mm (10°) after 30 s. This rate of decrease corresponds roughly to that observed in the previous measurement of R/μ . The only oscillation that was observed was a parasitic up-and-down movement presumably caused by the asymmetrical impulse delivered to the circle: it was quickly damped. When the primary current was switched off after 34 s, the scale reading went to -22 mm and slowly returned to zero.

The experiment was also performed using a natural silk thread taken from the cocoon, the torsion constant being $0.012 \text{ dyn cm rad}^{-1}$. The deflection was 220 mm, close to the 228 mm observed with the metal wire whose torsion constant is 275 times larger.

These measurements, though rough, confirm that Ampère could in fact have observed what he described and that his conclusions were, under the circumstances, perfectly reasonable.

Ce troisième extrait, Mendoza évoque l'intérêt de cette expérience du point de vue de l'histoire des sciences.

Ampère's observation was not one which allowed an ambiguous interpretation. This is an unusual situation, where an experiment is conducted accurately but gives what we later

learn to have been an incorrect result because of an unsuspected mode of operation of the apparatus. A comparable thing happened in those late 18th century attempts to measure Newton's constant of gravitation G by measuring the deviation from the vertical of a plumb line in the vicinity of a mountain, measurements which sometimes gave the wrong sign because of the unexpected phenomenon of isostasy. Certainly the Ampère-de la Rive experiment is an interesting one for a student laboratory in the history of physics. It can be used to point out the contrast in style between Ampère and Faraday. As Devons has perceptively remarked (Devons 1978):

'Ampère's experiments were typically, directed at answering 'Yes' or 'No' to a preconceived question. Faraday's, by contrast, were exploratory ... for Ampère, experiment was a judge, for Faraday an indispensable and trusted guide'.

- Annexe 3 : Calcul détaillé du moment des forces de Laplace :

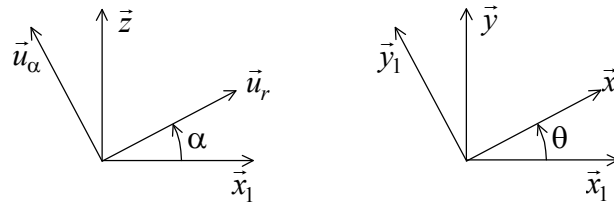


Figure 45-Définition des repères

$$\begin{aligned}\vec{u}_\alpha &= -\sin \alpha \vec{x}_1 + \cos \alpha \vec{z} \\ &= -\sin \alpha (\cos \theta \vec{x} + \sin \theta \vec{y}) + \cos \alpha \vec{z}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(\vec{u}_\alpha \times \vec{x}) &= (-\sin \alpha \cos \theta \vec{x} + \sin \alpha \sin \theta \vec{y} + \cos \alpha \vec{z}) \times \vec{x} \\ &= \sin \alpha \sin \theta \vec{z} + \cos \alpha \vec{y}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{u}_r &= \cos \alpha \vec{x}_1 + \sin \alpha \vec{z} \\ &= \cos \alpha (\cos \theta \vec{x} + \sin \theta \vec{y}) + \sin \alpha \vec{z} \\ &= \cos \alpha \cos \theta \vec{x} + \cos \alpha \sin \theta \vec{y} + \sin \alpha \vec{z}\end{aligned}$$

$$[\vec{u}_r \times (\vec{u}_\alpha \times \vec{x})] \cdot \vec{u}_z = \cos^2 \alpha \cos \theta$$

$$d\vec{M} \cdot \vec{u}_z = i_2 R^2 B \cos^2 \alpha \cos \theta d\alpha$$

$$\begin{aligned}\vec{M} \cdot \vec{u}_z &= i_2 R^2 B \cos \theta \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha d\alpha \\ &= i_2 R^2 B \cos \theta \left[\frac{\sin(2\alpha)}{2} + \frac{\alpha}{2} \right]_0^{2\pi}\end{aligned}$$

$$\vec{M} \cdot \vec{u}_z = i_2 R^2 B \cos \theta$$

Bibliographie :

Cette bibliographie est organisée de la manière suivante :

- I) *Bibliographie primaire : Textes du XIX^{ème} siècle*
- II) *Bibliographie secondaire :*
 - 1) *A propos de la vie d'Ampère*
 - 2) *A propos de la réalisation de l'expérience des courants d'influence par Ampère*
 - 3) *Au sujet des différentes répliques de l'expérience*
 - 4) *A propos de l'intérêt de la réplique en histoire des sciences*

I) Bibliographie primaire :

AMPERE, A.M., (1821), *Réponse à une lettre de M. Van Beck*, in Collection de mémoires relatifs à la physique, publiés par la Société française de physique, t.II, Mémoires sur l'électrodynamique, p.212-215

AMPERE, A.M., (1822), *Extrait d'un mémoire lu à l'Académie royale des sciences le 16 septembre 1822*, in Recueil d'observations électrodynamiques, p.321-322

AMPERE, A.M., (1822), *Notice sur quelques expériences nouvelles relatives à l'action mutuelle*, in Collection de mémoires relatifs à la physique, publiés par la Société française de physique, t.II, Mémoires sur l'électrodynamique, p.333-334

DE LA RIVE, A., *Mémoire sur l'action qu'exerce le globe terrestre sur une portion mobile du circuit voltaïque*, in Collection de mémoires relatifs à la physique, publiés par la Société française de physique, t.II, Mémoires sur l'électrodynamique, p.328

II) Bibliographie secondaire :

✓ A propos de la vie d'Ampère :

DE LAUNAY, Louis, (1936), *Le Grand Ampère*

WILLIAMS, L.P., (1970), *Ampère*, in Dictionary of Scientific Biography, Charles C. Gillispie ed., New York, p.139-147

O'CONNOR, J.J; ROBERTSON, E.F., 1998, *André Marie Ampère*, <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Ampere.html>

✓ A propos de la réalisation de l'expérience par Ampère :

BLONDEL, C., (1982), *Ampère et la création de l'électromagnétisme*, Bibliothèque Nationale

HOFMANN, J., *André-Marie Ampère, Electrodynamics and Enlightenment*, p.282-290, 309-315

ROSS, S., (1965), *The search for electromagnetic induction 1820-1831*, in Notes and Records of the Royal Society, p.184-219

TATON, R., (1955), *Ampère et l'induction*, in Causalités et accidents de la découverte scientifique, Masson, Paris, p.129-137

WILLIAMS, L.P., (1986), *Why Ampère did not discover electromagnetic induction*, in Am.J.Phys., 54(4), p.306-311.

✓ A propos des différentes réplifications:

MENDOZA, E., (1985), *Ampère's experimental proof of his law of induction*, in Eur.J.Phys., (6), p.281-286

THOMPSON, S.P., (1895), *Note on a Neglected experiment of Ampère*, in Philosophical Magazine, (39), p.534-541

✓ A propos de la réplification en histoire des sciences:

PESTRE, D., (1994), *La pratique de reconstitution des expériences historiques, une toute première réflexion*, in C.Blondel, M.Doerries, Restaging Coulomb, Olschki, p.17-30

RIESS, F. (2000), *Popularising science by performing historical experiments*, <http://www.bsbs.org.uk/conf/2000sciencecomm/papers/mueller.doc>

Table des matières :

Remerciements :	1
Résumé :	2
Introduction:	3
PARTIE 1 : PARTIE SCIENTIFIQUE :	5
Chapitre 1 : L'expérience retenue :	6
1) Son contexte :	6
□ L'état des connaissances sur l'électricité au début du XIXème siècle :	6
□ La pile Volta : pour la première fois l'électricité devient dynamique...	7
□ Oersted : premier lien entre l'électricité et le magnétisme :	8
□ Ampère et l'électromagnétisme :	8
□ Faraday et l'induction :	9
2) La réalisation de l'expérience par Ampère:	11
□ Première réalisation de l'expérience : juillet 1821 :	11
□ Seconde réalisation de l'expérience : Genève, septembre 1822 :	12
□ L'interprétation de la seconde expérience par Ampère :	13
3) Interprétation moderne de l'expérience :	14
4) L'intérêt de cette expérience du point de vue de l'histoire des sciences :	16
Chapitre 2 : La répllication :	17
1) L'intérêt de la répllication expérimentale en histoire des sciences :	17
2) Les différentes répllications de l'expérience d'Ampère :	18
3) Notre répllication :	19
□ La réalisation de notre réplique :	19
□ Les résultats obtenus :	20
Chapitre 3 : La simulation circuit du phénomène :	24
1) Une nouvelle méthode en histoire des sciences :	24
2) Mise en équation du phénomène :	24
□ Simulation du phénomène d'induction seul	24
□ Simulation du phénomène d'induction avec mouvement	26
3) Résultats :	29
□ Validation du modèle :	29
□ Discussion autour de la simulation :	34
Chapitre 4 : Le site Web :	36
1) Cahier des charges :	36
□ Vocation du site :	36
□ Public visé :	36
□ Forme :	36
2) Choix de la mise en forme :	36
3) Les différentes sections du site :	37
□ Eléments scientifiques et historiques :	38
□ Répllication	38
□ Simulation :	39
□ Eléments de physique moderne :	40
Conclusion sur la partie scientifique:	41
PARTIE 2 : ANALYSE DU PROCESSUS DE PROJET :	42
I) L'organisation de l'équipe :	43
1) La formation de l'équipe :	43
2) La répartition des tâches :	44
3) Le fonctionnement de l'équipe :	45
II) Le déroulement du projet :	45
1) Les grandes étapes de notre projet :	45
□ 1 ^{ère} étape : Recherches bibliographiques	45
□ 2 ^{ème} étape : Répllication et simulation	46

□ 3 ^{ème} étape : Finalisation du projet :	46
2) Evolution de nos objectifs :	47
3) Les différents intervenants extérieurs :	47
III) Les apports de ce projet:	48
1) Apports scientifiques et culturels :	48
2) Travail de pédagogie :	48
3) Apports en gestion de projet :	48
Conclusion :	50
Annexes :	51
□ Annexe 1:	51
□ Annexe 2 :	53
□ Annexe 3 : Calcul détaillé du moment des forces de Laplace :	55
Bibliographie :	56
Table des matières :	58