

Sous le haut patronage de Madame Frédérique Vidal, ministre de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation.

Avec le parrainage de Monsieur Gérard Mourou, prix Nobel de physique 2018.



SOUS L'ÉGIDE DU COMITÉ NATIONAL AMPÈRE 200 ANS

Pourquoi « Ampère 200 ans » ?



«La recherche expérimentale par laquelle Ampère a établi la loi de l'action mécanique entre les courants électriques est l'une des réalisations les plus brillantes de la science. L'ensemble de la théorie et de l'expérience semble avoir surgi, grandi et jailli, du cerveau du «Newton de l'électricité». Elle est parfaite dans sa forme, et d'une précision inattaquable, et elle se résume en une formule dont tous les phénomènes peuvent être déduits, et qui doit toujours rester la formule cardinale de l'électrodynamique».

James Clerck Maxwell, «Traité d'Électricité et Magnétisme » (1873)

Le nom « Ampère » existe et vit aujourd'hui à travers le monde. L'ampère (A) a été confirmé par la 26^e Conférence générale des poids et mesures tenue à Versailles en novembre 2018 comme l'une des sept unités de base du système international d'unités.

Mais qui connaît aujourd'hui André-Marie Ampère, savant à l'origine des découvertes qui ont marqué l'histoire des sciences

et de l'électricité et dont l'œuvre scientifique est indissociable des progrès dont nous bénéficions dans l'industrie et dans la vie de chaque foyer au quotidien ?

La Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication (SEE) et la Société des Amis d'André-Marie Ampère (SAAMA) sont les dépositaires d'un héritage culturel et scientifique exceptionnel en étant notamment propriétaire de la maison familiale d'Ampère, à Poleymieux-au-Mont-d'Or, pour la première, et en charge de l'entretien de la maison et du fonctionnement du Musée Ampère dans son sein pour la deuxième. Elles sont garantes ainsi de la mémoire du savant depuis plus de 90 ans.

Il est ainsi apparu légitime de mettre à l'honneur Ampère pour le 200^e anniversaire de la découverte des lois de l'électrodynamique. La SEE et la SAAMA ont ainsi pour ambition, au travers de l'initiative Ampère 200 ans, de faire connaître l'œuvre d'Ampère, de rappeler ses mérites, son influence et le rayonnement de ses travaux, et de promouvoir le domaine des sciences de l'électricité, en rendant un hommage national et international au savant.

Les commémorations, qui se déroulent à Paris et dans les grandes villes de province et à l'étranger (Genève, Montréal...), sont l'occasion pour de nombreux scientifiques, industriels, chercheurs, professeurs, étudiants et élèves de se rencontrer et de communiquer afin de partager avec le public leurs réflexions sur l'importance prise par l'électricité dans le monde moderne, sur les avancées que celle-ci a permis d'obtenir dans la vie industrielle et la vie de tous les jours, enfin d'en présenter les enjeux pour l'avenir et les implications pour notre société dans le développement durable et la formation des jeunes.

Cette initiative participe ainsi :

à la notoriété d'Ampère et à donner ce savant en exemple à notre jeunesse afin qu'il soit reconnu et honoré pour ses talents de découvreur et d'inventeur et pour la place éminente qu'il occupe dans la formidable évolution des sciences physiques au XIX^e siècle ;

à contribuer à donner à l'électricité une image d'avenir auprès des jeunes générations dans un contexte de développement durable et de transition énergétique vers la neutralité carbone où ce vecteur revêt une importance croissante dans un grand nombre de secteurs (bâtiments, transports, industrie, médecine ...).

Ampère 200 ans

Les commémorations « Ampère 200 ans » ont pour but de sensibiliser le grand public sur l'importance des découvertes d'Ampère et sur leurs applications. « Ampère 200 ans » sont des expositions dans les musées, des conférences, des animations dans les établissements scolaires ou universitaires, des événements qui permettent à tous les publics de mieux connaître le domaine de l'électricité et l'homme illustre qu'était André-Marie Ampère. Un site web « ampere200ans.fr » a été créé pour cette occasion.

Des nombreuses manifestations ont été réalisées, certaines à distance dans le contexte sanitaire imposé par la pandémie du Coronavirus : un concours national destiné aux écoles, collèges et lycées ainsi qu'à l'enseignement supérieur, expositions temporaires ou itinérantes dans des campus, bibliothèques et musées, des installations ou ateliers comme lors de la Fête de la Science, la réalisation de fascicules, vidéos et d'une pièce de théâtre, ... avec en particulier :

- Une séance grand public de l'Académie des sciences, délocalisée à Lyon, à l'Académie des sciences et des belles lettres et à l'Ecole normale supérieure, en février 2020,
- Une journée nationale Ampère 2020 le 23 novembre 2020 avec un dossier publié dans la REE repris dans le présent fascicule
- Des conférences et expositions dans les écoles ou universités (CentraleSupélec, Polytechnique, INSA et Laboratoire Ampère à Lyon, ESME Sudria-Lyon),

- Des présentations dans les congrès internationaux : SEE MAT-POST à Lyon, CIGRE, CIRED et EPE... Afcas et CONFREGÉ au Canada,

- Des journées sur les « métiers de l'électricité » à l'occasion de la semaine de l'industrie en novembre 2021 dans différentes villes.

- Les poses commémoratives d'une plaque « Historic Site » de l'European Physical Society avec la SFP au Musée Ampère et d'une plaque « Milestone Ampère » de l'IEEE au Collège de France avec la valorisation de la table d'expériences d'Ampère.

Manifestations diverses

Sur la mobilité électrique/ durable avec des conférences et :

- Une journée SEE sur la mobilité électrique
- Soutien au rallye Watt'Elles et présentations à « l'Eco Race » d'Albi en octobre 2021
- Inauguration de la nouvelle borne de recharge de véhicule électrique installée à la Maison d'Ampère

Des conférences, inaugurations ou portes ouvertes avec les industriels du secteur électrique et, avec la Ville de Lyon, une conférence à l'occasion de la rénovation de la place Ampère en janvier 2020.



Une des expériences animées illustrant les découvertes d'André-Marie Ampère qui peut être actionnée par le visiteur à la Maison d'Ampère – Musée de l'Électricité à Poyémieux au Mont-d'Or.



La Maison d'Ampère – Musée de l'Électricité à Poleymieux au Mont-d'Or.

La Maison d'Ampère Musée de l'électricité

La maison familiale Ampère, où André-Marie a passé son enfance et étudié avec brio auprès de son père, sans fréquenter l'école, a eu une destinée exceptionnelle. Le domaine de Poleymieux-au-Mont d'Or (Rhône) où elle est située, à une vingtaine de kilomètres de Lyon, fut mis sous séquestre au profit de la Nation en 1793, au moment où la Révolution condamnait à mort le père du futur savant. Restituée à la famille deux ans plus tard, elle échut en 1812 à Ampère, après la mort de sa mère. Il s'en dessaisit une dizaine d'années plus tard quand il s'établit définitivement à Paris.

Il fallut un siècle pour que le domaine de Poleymieux retrouve le souvenir de son prestigieux propriétaire d'antan ; c'est sur les conseils de Paul Janet, membre de l'Académie des Sciences et alors directeur de Supélec, que deux riches industriels américains, Hernand et Sosthène Behn, achetèrent le domaine en 1928 pour en faire don à la Société française des électriciens, qui le confia à la Société des Amis de André-Marie Ampère, créée pour perpétuer la mémoire de l'illustre lyonnais. Le Musée de l'électricité fut inauguré le 1^{er} juillet 1931.

La Maison d'Ampère, labellisée « Maison des illustres » par le ministère de la Culture, joue un rôle moteur dans la démarche de communication sur André-Marie Ampère et sur son œuvre.

Composée de 14 salles, d'une salle de projection et d'un espace d'activités, elle consacre plusieurs salles à parcourir la vie du savant et à ses découvertes dans le domaine de l'électrodynamique, mais aussi en chimie et mathématiques. Le Musée Ampère parcourt ainsi l'histoire de l'électricité et de ses applications depuis les découvertes dans l'antiquité aux applications les plus modernes, en passant par la production et la distribution de l'électricité.



Etude de l'énergie photovoltaïque pendant les ateliers découverte.



Salles de La Maison d'Ampère – Musée de l'Électricité, en particulier lors des activités des Ateliers Découverte.

En plus des visites libres ou guidées, le Musée propose une offre destinée aux groupes scolaires de tous les niveaux, « Les Ateliers Découverte » qui accueillent des classes accompagnées avec leurs enseignants avec lesquels un programme d'activités à la demi-journée ou à la journée est organisé. Les « Ateliers Découverte » reçoivent principalement des élèves de collège et lycée, mais aussi des classes de primaire, formation professionnelle ou des écoles d'ingénieurs, soit plus de mille « découvreurs » par an ; ils sont ouverts aussi aux familles pendant les vacances. Leur contenu évolue avec les nouvelles installations (panneaux photovoltaïques, éolienne, minicentrale hydraulique, station « vélo à assistance électrique ») et les innovations techniques en proposant les premiers ateliers informatiques d'apprentissage du codage et de la robotique. Le musée présente aussi les avancées dans les énergies durables (éolien, solaire, hydro-électrique, pile à hydrogène).

Le musée participe aussi aux Journées européennes du patrimoine et à la Fête de la science.

Enfin, le Musée Ampère est également un lieu d'accueil pour des entreprises, groupes académiques ou des chercheurs désirant coupler une réunion avec la visite du Musée ou bien réaliser une journée d'échanges avec un programme culturel et/ou des activités de détente (promenade, visite du village de Poleymieux,...). La salle Ampère avec une capacité de 50 personnes propose toutes les facilités nécessaires pour ce type d'évènement. ■



Vues de la Salle Ampère utilisée pour des séminaires, réunions et d'autres activités.

La commémoration « Ampère 200 ans »

François Gerin

Président du Comité national Ampère 200 ans
Président de la SEE

La Journée Ampère 2020, le lundi 23 novembre 2020, a célébré le bicentenaire de la découverte par André-Marie Ampère des premières lois de l'électrodynamique en 1820 (faisant suite aux expériences d'Hans Christian Ørsted, début 1820).

Il nous a semblé important de regrouper dans ce fascicule de la REE que vous lisez les interventions, conférences et tables rondes qui ont marqué cette journée historique, et que plus de 450 personnes ont suivies assidument à distance. Leurs auteurs et les participants aux tables rondes ont bien voulu préparer leurs résumés avec l'aide précieuse d'Alain Brenac, Rédacteur en chef de la REE, et de Bernard Ayrault, membre du comité de rédaction : que tous en soient remerciés vivement. Ce document donne une synthèse de l'ensemble des pré-

sentations et l'intégralité des enregistrements de la Journée disponibles sur le site www.ampere200ans.fr. Par ailleurs, la revue 3EI donne en parallèle une série d'articles plus détaillés des présentations.

« Ampère 2020 », devenue « Ampère 200 ans » au seuil de l'année 2021, au-delà de la reconnaissance des talents et de l'œuvre d'Ampère, est en effet une action collective tournée vers la jeunesse ; son objectif est notamment de revaloriser les métiers de l'électricité et de promouvoir les filières techniques, avec tous les partenaires de cette commémoration.

Autour de la SEE et de la SAAMA, le Comité national Ampère 200 ans rassemble des partenaires nombreux et actifs, en particulier les Unions de professeurs de physique-chimie (UdPPC) ou de classes préparatoires (UPS) et l'Inspection générale de l'Éducation et de la jeunesse. Nous prévoyons des actions pour valoriser le domaine des sciences et techniques et redonner à l'électricité une image attractive, actions déclinées dans les principales villes et accompagnées aussi par les associations partenaires comme IESF, SFP, UFE, Gimelec et le SERCE. ■

-
- **Présentation par François Gerin** page 6
 - **Discours de Madame Frédérique Vidal, ministre de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation** page 7
 - **Allocution de Monsieur Gérard Mourou, prix Nobel de physique 2018, Parrain de la Commémoration Ampère 200 ans** pages 8-9

Conférences

- **Xavier Dufour : André Marie Ampère (1775-1836), le génie et les larmes** pages 10-11
- **Edmond Amouyal : La lumière. Une histoire d'amitié entre Fresnel et Ampère** pages 12-13
- **Hélène Fischer : Ampère, le Newton de l'électrodynamique** pages 14-15
- **Wilfrid Poirier : L'unité ampère, de l'électrodynamique à la mécanique quantique** pages 16-17
- **Laila Zwisler : Ørsted, un précurseur de l'électromagnétisme** pages 18-19

Tables rondes

- **« Du bonhomme d'Ampère au Tokamak », animée par Bernard Bigot**
Panel : Alain Bécoulet, Jean Daillant, Daniel Verwaerde pages 20-21
- **« Du moteur d'Ampère à la mobilité électrique », animée par Philippe Watteau**
Panel : Patrick Bastard, Yann Vincent, Florence Lambert pages 22-23
- **Composition du Comité national Ampère. Remerciements** page 24

Discours de Madame Frédérique Vidal, ministre de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation

Monsieur le président de la SEE, Cher Monsieur Gerin, Monsieur le professeur, Cher Gérard Mourou,

Mesdames Messieurs,

Si le nom d'Ampère nous est hautement familier depuis l'entrée du courant électrique dans le système international d'unités, l'homme et son œuvre restent en revanche largement méconnus du grand public, alors même que leur héritage est partout présent dans notre quotidien.

Je me réjouis donc que la Société de l'électricité, de l'électronique et des TIC, ainsi que la Société des amis d'André-Marie Ampère, se soient attelées à résoudre ce paradoxe en lançant la Commémoration Ampère 2020, dont cette journée est l'un des temps forts. Votre engagement dans l'organisation de cet événement fait honneur au rôle de passeur des sociétés savantes et je tiens à vous remercier de l'avoir maintenu en dépit de circonstances particulièrement contraignantes.

C'est dans le contexte-même de la crise sanitaire que nous traversons qu'une initiative comme celle-ci prend tout son sens : à l'heure où tous les yeux sont braqués sur la recherche et où l'espoir le dispute à la défiance, il me paraît essentiel de nous souvenir de tout ce que l'on doit à la science et aux scientifiques. Et on ne pouvait trouver meilleur exemple qu'André-Marie Ampère pour illustrer la beauté et la fécondité de la quête de connaissance.

Il y a 200 ans, André-Marie Ampère présentait à l'Académie des sciences son hypothèse sur les courants électriques et leurs interactions apportant ainsi une explication à l'expérience d'Ørsted. Bousculant toutes les théories en vigueur, cette découverte posait les bases de l'électrodynamique.

Cette plongée dans notre passé scientifique nous rappelle deux choses essentielles : la première, c'est qu'« *il n'y a pas d'un côté la recherche fondamentale et de l'autre la recherche appliquée. Il y a la recherche et les applications de celle-ci, unies l'une à l'autre comme le fruit de l'arbre est uni à la branche qui l'a porté* », pour citer un grand biologiste contemporain d'Ampère. Car les travaux d'Ampère n'ont pas seulement bouleversé la physique, ils ont ouvert la voie au moteur électrique, à la deuxième révolution industrielle, et au-delà, au confort moderne et aux innovations futures en matière de production, de stockage et de distribution d'énergie.



La science est un processus continu, auquel chaque chercheur apporte sa pierre, dans le temps et dans l'espace. Les travaux d'Ampère sont indissociables de ceux de Hans Christian Ørsted, de Faraday, de Maxwell... jusqu'à ceux du parrain d'ouverture d'aujourd'hui, Gérard Mourou.

Aujourd'hui, il est indispensable de poursuivre cette lignée. Mettre à l'honneur Ampère, c'est redonner ses lettres de noblesse à l'électricité, qui est en perte de vitesse auprès des jeunes, alors même que la transition énergétique confère

à ses métiers un sens et une ambition nouvelle, du laboratoire à l'usine. C'est aussi donner une autre image des scientifiques, loin de cette rationalité froide, close sur elle-même, exclusive, qu'on leur attribue parfois. Car Ampère était un esprit libre et passionné, qui ne s'est jamais laissé enfermer dans les limites d'une seule discipline, ni même de la seule raison. Comme cette Journée va le montrer, son héritage scientifique déborde largement l'électrodynamique : les mathématiques, la chimie, la philosophie, la métaphysique, la langue même, sont redevables à celui qui a contribué à la découverte de trois halogènes, forgé des néologismes comme cinématique et cybernétique et qui établit une classification de toutes les connaissances humaines. Encyclopédiste et romantique, rationnel et croyant, il avait foi en l'unité de la science et plus encore, en l'humanité. Perfectionner moi-même et les hommes, voilà l'idée que j'ai toujours devant les yeux, écrivait-il.

La reconquête de l'attractivité et de la confiance est au cœur de la loi de programmation de la recherche qui vient d'être votée au Parlement après plus d'un an et demi de travaux, de réflexions et de débats. Grâce aux moyens inédits qu'elle investit dans notre recherche, grâce à la reconnaissance légitime qu'elle accorde à la communauté scientifique, je suis convaincue que la science retrouvera la place qu'elle mérite dans notre vie culturelle et démocratique, dans nos stratégies économiques et industrielles, dans nos réponses aux grands défis de notre temps, dans notre rapport au monde. Avec ce texte, nous pouvons, si nous nous en saisissons tous ensemble, faire de la prochaine décennie la décennie de la recherche. En s'ouvrant sur la célébration de ce grand savant universel qu'était Ampère, dont le cœur était aussi vaste que l'esprit, je crois qu'elle ne pouvait démarrer sous de meilleurs auspices.

Merci à tous et félicitations pour cette belle journée. ■

Allocution d'ouverture de la Journée Ampère du 23 novembre 2020



Gérard Mourou

Prix Nobel de Physique 2018

Parrain des manifestations Ampère 200 ans

C'est pour moi un grand honneur d'être le parrain de toutes les manifestations de commémoration des 200 ans de la création de l'électrodynamique par André-Marie Ampère (1775-1836). Dès mon enfance, avec un père ingénieur et un grand-père technicien tous deux travaillant chez EDF, j'ai été sensible et très attentif à tout ce qui touche à l'électricité, et donc au génie que nous admirions tous, André-Marie Ampère.

A la suite de l'expérience mémorable du physicien et chimiste danois Hans Christian Ørsted (1777-1851), expérience publiée en juillet 1820 et qui montrait l'effet d'un fluide électrique sur l'aiguille aimantée d'une boussole, ce qui indiquait clairement l'existence d'une interaction entre les phénomènes électriques et magnétiques, André-Marie Ampère qui, comme Ørsted, croyait à l'unité des phénomènes physiques, sera le premier – une semaine après la présentation de cette expérience à l'Académie des sciences – à en donner l'explication rigoureuse le 18 septembre 1820 et à élaborer les premières lois de l'électrodynamique et de l'électromagnétisme. Ces découvertes séminales d'Ampère ont ouvert de nouveaux champs de recherche à l'électricité et aux applications qui en ont découlé ; leurs développements ont permis l'essor de l'industrie et le confort matériel dont nous bénéficions tous aujourd'hui dans notre vie quotidienne avec une telle facilité que la plupart d'entre nous en a oublié les fondements et les techniques qui la régissent.

De plus la facilité avec laquelle l'électricité est de nos jours utilisée n'incite pas à s'y intéresser : les techniques numériques et les outils associés sont présents en permanence et passionnent. Ce n'est plus le cas des phénomènes électriques, mais ces nouvelles techniques n'existeraient pas sans Elle, l'Électricité !

L'Électricité est aussi un domaine qui est devenu étranger à beaucoup et plus spécialement aux jeunes. Force est de constater que les jeunes n'ont pas une attirance forte pour elle. Les écoles d'ingénieurs, en particulier, ressentent une profonde désaffection dans cette branche de la physique au profit d'autres formations mises plus au premier plan comme celles portant sur l'environnement ou l'économie circulaire en lien avec la préservation de notre avenir et de la nature....

Mais dans quel monde vivrions-nous aujourd'hui si tous ces progrès ou ces inventions n'avaient pas permis à l'électricité de préserver ces richesses, qui auraient alors disparu : les lois fondamentales de l'électricité ont conduit entre autres au moteur électrique qui a progressivement remplacé la machine à vapeur avec tous les avantages que l'on connaît, et il n'y a pas une entreprise, une habitation ou un véhicule qui ne possède pas une installation ou des composants qui fonctionnent à l'électricité voire avec des piles...

Nous sommes, en effet, à la croisée de deux mondes :

- le monde d'aujourd'hui et de demain pour lequel l'usage de cette électricité est vital pour vivre et donner une perspective d'avenir, comme pour mobiliser sur des défis qui nous attendent. Il faut pouvoir entraîner les jeunes et bien sûr intéresser tous nos concitoyens ; les actions de communication et de vulgarisation devraient conduire à revaloriser l'image à la fois des techniques mais aussi de leur intégration dans les enjeux environnementaux.

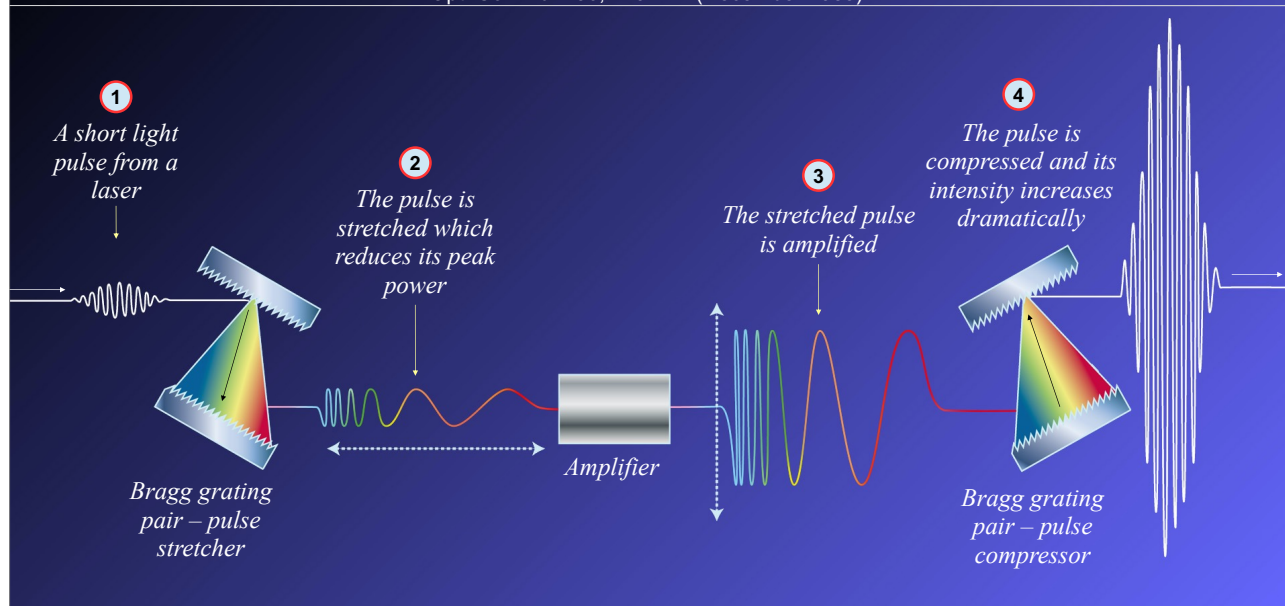
- le deuxième monde, c'est celui qui nous vient de l'Histoire qui a été écrite par des hommes remarquables. Ils ont permis de nous faire connaître toutes ces évolutions et profiter pleinement de ces découvertes.

Ampère, ce génie, a incarné toute sa vie la curiosité scientifique et le goût de l'innovation pour faire avancer la science et servir l'humanité : polymathe, à l'image de Léonard de Vinci, il fut un grand

" Ampère, ce génie, a incarné toute sa vie la curiosité scientifique et le goût de l'innovation pour faire avancer la science et servir l'humanité."

Chirped Pulse Amplification (CPA)

D. Strickland and G. Mourou, "Compression of Amplified Chirped Optical Pulses,"
Opt. Commun. 56, 219-221 (December 1985).



physicien, mathématicien et chimiste, mais également philosophe, poète, polyglotte et un romantique. Ampère a toujours été un des personnages scientifiques les plus fascinants et attachants.

Les travaux d'Ampère ont ouvert la voie à la théorie de Maxwell (1831-1879) qui unifie l'électricité, le magnétisme et la lumière, géniale intuition qu'avait eue Ampère en 1801. Maxwell conclut, en effet, que la lumière est une onde électromagnétique.

Mes travaux portent sur une lumière particulière, la lumière extrême qui m'a valu le prix Nobel de physique 2018, partagé avec mon ancienne étudiante Donna Strickland.

J'ai mené mes recherches essentiellement dans le domaine des lasers à impulsions optiques ultra-courtes, de l'ordre de la femtoseconde, soit un milliardième de milliardième de seconde, et nous avons inventé une technique d'amplification à dérive de fréquence (CPA, Chirped Pulse Amplification) générant des impulsions ultra-courtes, encore plus courtes que la femtoseconde, et de très haute intensité (voir figure ci-dessus). On peut ainsi obtenir des puissances considérables (mesurées en petawatt, soit 1 joule durant une femtoseconde), permettant d'aller dans des domaines de la physique inatteignables auparavant. Une première application de notre technique CPA avec des lasers femtoseconde est de creuser la matière sans l'endommager, y compris à l'intérieur du matériau ; la plus connue, en chirurgie ophtalmologique, permet de corriger la vue de millions de personnes chaque année.

J'envisage par ailleurs, la possibilité de produire par fission de l'énergie propre et abondante, en utilisant le thorium, ou la transmutation des déchets pour réduire à quelques mois leur durée de vie

radioactive. Je propose également le nettoyage de l'espace proche de la terre de ses débris, en les dé-orbitant à l'aide d'impulsions de laser ultra-intenses focalisées sur eux. Ce qui continue à me faire rêver, ce sont vraiment toutes les applications futures de notre invention. Ce qui nous anime, c'est la passion de la recherche, pas les espoirs de prix Nobel, et notre curiosité qu'il nous faut assouvir.

Ainsi, durant cette Journée de commémoration très riche, j'ai énormément appris sur Ampère, ainsi que sur toutes les applications présentées dans ce fascicule et qui ont résulté de ses découvertes.

Ampère a créé et lancé l'électrodynamique, le courant continu, et je vois personnellement des avancées vers l'électromagnétisme, où en augmentant les fréquences on devient beaucoup plus performant ; cela conduit à des systèmes beaucoup plus petits, comme l'ont montré les présentations sur l'état d'avancement du projet international ITER et des travaux sur le synchrotron SOLEIL.

J'aime à faire le parallèle entre l'électromagnétisme et ses héros Ampère, Fresnel, CErsted, Maxwell, la lumière et l'avènement de la lumière cohérente et du laser avec Einstein, Townes, Maiman, qui comme l'électricité a induit une profonde transformation sur notre société.

Tout naturellement, j'ai été enthousiasmé par cette démarche de commémoration pour faire connaître ou redécouvrir l'œuvre d'Ampère et promouvoir auprès des jeunes et du grand public, le domaine des Sciences, en particulier celui de l'Electricité, et pour faire rêver aux perspectives que cette œuvre nous permet encore aujourd'hui d'envisager pour le futur. ■

André-Marie AMPERE (1775-1836), le génie et les larmes



Xavier Dufour

Professeur de mathématiques
et de philosophie

La célébration des fulgurantes découvertes d'André-Marie Ampère, réalisées en septembre 1820 dans le domaine de l'électromagnétisme, ne doit pas occulter les multiples facettes d'un autodidacte génial, à la jonction de l'Encyclopédie et du romantisme. Officiellement mathématicien, volontiers chimiste, à l'occasion naturaliste mais toujours philosophe, Ampère fut aussi un homme de cœur, sensible et mystique, dont la vie fut marquée par de cruelles épreuves.

Une jeunesse romantique

Né dans une famille lyonnaise du quartier Saint-Nizier, Ampère grandit dans le cadre bucolique des Monts d'Or lyonnais et s'initie librement aux disciplines les plus diverses : insatiable lecteur de l'Encyclopédie, il dévore auteurs classiques et manuels de botanique, de mathématiques, compose des poèmes et écrit un traité sur la quadrature du cercle à treize ans. A 18 ans, il maîtrise parfaitement la Mécanique de Lagrange. En 1793, son père qui occupait les fonctions de juge de paix est guillotiné au terme du siège de Lyon. Le jeune homme sombre dans une dépression d'un an avant de retrouver son activité débordante qui lui fit même composer une langue universelle. A 21 ans, il rencontre Julie Carron qu'il épouse en 1799 et qui lui donnera un fils, Jean-Jacques, futur écrivain et académicien.

Nommé professeur de physique à Bourg-en-Bresse, Ampère se signale à la communauté scientifique par deux traités de mathématiques. A peine muté au lycée de Lyon, il assiste à la mort de sa femme qui le laisse veuf à 28 ans. Désespéré, il fréquente de jeunes intellectuels marqués par le traumatisme révolutionnaire, en particulier le penseur Pierre-Simon Ballanche ainsi que Claude-Julien Bredin. Les trois amis fondent en 1804 un cercle de réflexion, la « Société chrétienne », où l'on discute philosophie et religion. Cercle éphémère mais dont les amitiés irrigueront toute la vie ultérieure d'Ampère et où les historiens reconnaîtront une des « sources occultes du romantisme » (A. Vialatte).

Paris, entre science et philosophie

Nommé répétiteur de mathématiques à l'Ecole polytechnique en 1804, Ampère fréquente l'élite scientifique pari-

sienne, animée par Laplace, tout en se passionnant pour la philosophie de Maine de Biran. Ce dernier jette les bases d'un spiritualisme fondé sur la primauté de la volonté, contre le matérialisme dominant qui réduisait les facultés humaines à la combinaison de sensations passives. Sensible à l'orientation spirituelle de cette doctrine, Ampère s'efforce de la compléter par une doctrine réaliste de la connaissance. Par sa théorie de l'abstraction des « relations noumérales », il s'efforce de montrer que la science atteint bien la structure de la réalité physique.

Simultanément, il s'enthousiasme pour la chimie, découvre le chlore et le fluor, établit la loi des gaz dite d'Avogadro-Ampère et fonde une théorie de la réaction chimique sur la distinction entre atomes et molécules (1814). En 1820, il révolutionne en quelques jours le monde de la physique et fonde une science nouvelle, l'électrodynamique. La célèbre *Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques* uniquement déduite de l'expérience (1826), synthèse de ses travaux, fait allégeance dans son titre à la conception newtonienne de la science alors en vigueur. Mais en réalité, elle ouvre la voie à une physique nouvelle, à distance des forces centrales, incarnée aussi par Fresnel et Arago.

“Par sa théorie de l'abstraction des « relations noumérales », il s'efforce de montrer que la science atteint bien la structure de la réalité physique.”

Entre-temps, le savant a accédé aux plus hautes fonctions académiques : professeur à l'Ecole Polytechnique en 1807, professeur légendaire pour ses distractions et ses digressions, Inspecteur général en 1808, ce qui l'obligera à de longues tournées en province, membre de l'Académie des sciences à la section géométrie en 1814 et professeur au Collège de France à la chaire de physique en 1824. Cette même année, il publie un long article d'anatomie comparée pour défendre les thèses de Geoffroy Saint-Hilaire sur « l'unité de plan » des espèces animales, apportant une foule d'arguments contre l'avis de Cuvier. Le débat entre Ampère et Cuvier se poursuivra six ans plus tard au Collège de France.

Tribulations affectives et spirituelles

Mais ce génie de l'abstraction est un passionné au tempérament instable, privé de discernement affectif. Son remariage en 1806 avec une intrigante s'achève par une séparation, au moment où naît sa fille Albine. Dans ce contexte, celui qui fut un apôtre à l'époque lyonnaise, va traverser une crise religieuse et morale de 12 années, exacerbée par ses tourments affectifs. On suit les méandres de cette crise dans l'abondante correspondance entre Ampère et Bredin, resté à Lyon. En mars 1814, contraint de renoncer à une liaison, Ampère frôle même le suicide. Ce n'est qu'en 1817 qu'il retrouve le chemin d'une foi apaisée. En octobre, un choc spirituel lui inspire une méditation aux accents pascaliens : « *Mon Dieu, que sont toutes ces sciences, tous ces raisonnements, toutes ces découvertes du génie [...] que le monde admire et dont la curiosité se repaît si avidement ? En vérité rien que de pures vanités.* »

Certes, Ampère n'abandonne pas l'activité scientifique, loin s'en faut. Mais la recherche des vérités partielles des sciences positives ne peut suffire à combler l'intelligence : la philosophie, « seule science vraiment importante » permet de porter un regard plus vaste sur l'activité intellectuelle et d'évaluer chaque savoir. Enfin, c'est à la foi d'éclairer les questions ultimes. Au mysticisme de la connaissance qui fait d'Ampère un des derniers savants universels, répond l'intensité de sa vie spirituelle. « *Je ne vois que des vérités, enseigne-moi la Vérité !* » écrivait-il à Bredin.

“En 1820, il révolutionne en quelques jours le monde de la physique et fonde une science nouvelle, l'électrodynamique.”

Les dernières années

A partir de 1829, Ampère revient à un vieux projet : persuadé de l'analogie profonde entre les lois de l'univers et l'organisation de l'intelligence, il se lance dans une classification de toutes les connaissances humaines, œuvre ultime d'un esprit encyclopédique capable d'embrasser les domaines les plus divers en quête d'une unité qui les transcende. Publié en 1834 pour son premier volume consacré aux « sciences cosmologiques » et en 1836 pour le second volume, posthume, consacré aux « sciences noologiques » (on dirait aujourd'hui humaines), cette classification étonne par son architecture rigoureusement dichotomique. Celle-ci est justifiée par des considérations de psychologie de la connaissance, autre sujet qu'Ampère avait longuement développé dans ses travaux philosophiques.

En 1831, le savant accueille un étudiant en droit qu'il va héberger durant plus d'un an, Frédéric Ozanam. Le futur universitaire, spécialiste de Dante et célèbre polémiste du catholicisme social, relate dans sa correspondance les conversations domestiques, le tempérament et les distractions de son hôte ainsi que sa piété simple et abandonnée. Soulignant l'intelligence si intuitive du savant, il note : « *Les découvertes qui l'ont porté au rang où il est aujourd'hui lui sont venues dit-il tout à coup, sans savoir comment...* »

Le 10 juin 1836, en tournée d'inspection à Marseille, Ampère meurt après un jour d'agonie. A quelqu'un qui lui proposait d'entendre *L'Imitation de Jésus-Christ*, il aurait répondu : « *C'est inutile, je la connais tout entière par cœur* ». Ainsi s'éteignit un savant passionné, sensible et généreux, dont il revient à son ami de cœur Bredin de tracer un dernier portrait : « *Jamais homme n'aima comme il aimait. Je ne sais ce qu'il faut admirer le plus, de ce cœur ou de ce cerveau...* » ■

L'auteur

Xavier DUFOUR, né en 1963, est ingénieur physicien (1988), agrégé de mathématiques (1991), docteur en philosophie (2003). Il a soutenu une thèse sur « André-Marie Ampère, une philosophie de la connaissance ».

Professeur de mathématiques et de philosophie au lycée Sainte-Marie de Lyon, il a également enseigné la philosophie de la connaissance à la faculté de philosophie de l'université catholique de Lyon. Il a publié des articles sur la philosophie d'Ampère (Sabix), sur sa spiritualité, ainsi que des ouvrages sur le fait religieux à l'école.

La lumière

Une histoire d'amitié entre Fresnel et Ampère



Edmond Amouyal

Directeur de recherche émérite au CNRS
Laboratoire des Solides Irradiés, Ecole
Polytechnique

La théorie ondulatoire de la lumière d'Augustin Fresnel et celle de l'électrodynamique d'André-Marie Ampère, sont les fruits d'une véritable collaboration -peu connue- entre deux savants fidèles en amitié, généreux et géniaux. Elles constituent deux des plus grandes découvertes du XIX^{ème} siècle, à l'origine du formidable essor de la recherche et de l'innovation industrielle.

Introduction

Dès le VI^{ème} siècle avant notre ère, les philosophes Grecs se sont interrogés sur l'origine et la nature de la lumière. Mais ce n'est qu'au XVI^{ème} siècle que d'importants travaux scientifiques vont apparaître, en particulier ceux de Kepler, Galilée, Snell et de Descartes qui publie en 1637 les lois de l'optique géométrique et qui considère comme les atomistes grecs que la lumière est de nature corpusculaire. Peu après, Grimaldi découvre la diffraction de la lumière. Ses travaux et ceux de Huygens (1629–1695) militent en faveur de la conception ondulatoire de la lumière. A la même époque, Newton (1642–1727) va s'opposer au concept ondulatoire et son aura est telle qu'il va imposer, durant plus d'un siècle, son approche mécaniste de la théorie corpusculaire de la lumière. Mais en 1801, l'hypothèse ondulatoire de la lumière renaît avec les expériences de Thomas Young (1723–1829) qui observe par diffraction à travers deux fentes, ses fameuses franges d'interférences. Il conclut que la lumière est de nature ondulatoire, sans le démontrer, ce que fera génialement Augustin Fresnel en 1815.

Augustin Fresnel (1788–1827)

Augustin Fresnel est né le 10 mai 1788 à Broglie (Eure) dans le château des Ducs de Broglie. A 16 ans, il intègre l'Ecole polytechnique. En 1809, il est Ingénieur des Ponts et Chaussées de département. En 1814, il adresse à son professeur André-Marie Ampère (1775–1836), son premier travail scientifique intitulé « Rêveries ». Ampère n'y prête pas attention. Fresnel se tournera alors vers François Arago (1786–1853) qui l'encourage à s'orienter résolument vers l'optique. Fresnel va retrouver les résultats de Young et il adressera, le 15 octobre 1815, à l'Académie des Sciences, son premier mémoire sur la diffraction de la lumière. Il fait l'hypothèse que la lumière est de nature ondulatoire en attaquant d'emblée la théorie corpuscu-

laire de Newton. Ampère, newtonien comme tous les savants de l'époque, est convaincu et séduit par la rigueur mathématique de la démonstration du jeune Fresnel. C'est de là que date leur amitié et leur collaboration scientifique, amitié et complicité qu'ils partageaient avec Arago.

Théorie ondulatoire de la lumière de Fresnel, la contribution d'Ampère

Ampère est séduit par la théorie ondulatoire de la lumière de Fresnel qui explique, non seulement la diffraction et les interférences que n'explique pas Newton, mais aussi la réflexion et la réfraction de la lumière. La théorie de Fresnel est cependant fortement contestée par les newtoniens, en premier lieu Siméon-Denis Poisson (1781–1842). Pour confronter les deux théories, l'Académie des sciences lance en 1817 un concours sur la diffraction de la lumière. Ampère va pousser Fresnel à concourir, et c'est Arago qui fera l'expérience en 1819 : la tache brillante prédite par Poisson apparaît, Fresnel et sa théorie triomphent. Son mémoire soumis le 29 juillet 1818 sera couronné par l'Académie des sciences.

L'amitié et l'échange d'idées entre Fresnel et Ampère vont transparaître lorsque Fresnel s'attaque au problème de la polarisation de la lumière par réflexion découverte en 1808 par Malus. La lumière

“Il montre, entre autres, que le phénomène est un flux électrique continu et non discontinu, et il est le premier à nommer ce flux « courant » électrique.”

naturelle n'est pas polarisée : elle vibre dans toutes les directions le long de son chemin de propagation. Elle est polarisée lorsqu'elle vibre dans une direction fixe. L'explication de Malus et des autres newtoniens est peu convaincante. Fresnel applique sa théorie en faisant l'hypothèse d'une onde lumineuse longitudinale, donc vibrant dans le plan de propagation de la lumière. Mais cela ne rend pas compte de ses résultats expérimentaux. Ampère lui suggère alors d'envisager une hypothèse révolutionnaire, celle d'une *vibration lumineuse purement transversale*, c'est-à-dire perpendiculaire au plan de propagation. Aucun savant de l'époque, y compris Arago, ne cautionnera cette hypothèse de rupture. Fresnel publiera en 1820 une revue complète de sa théorie ondulatoire de la lumière. Il nommera polarisation rectiligne ce phénomène pour le distinguer des phénomènes de polarisation circulaire et elliptique qu'il est le premier à expliquer.

Ampère et l'électrodynamique, la contribution de Fresnel

L'année 1820 est également une grande année pour Ampère et la physique. Le 11 septembre 1820, Arago reproduit l'expérience de Hans Christian Ørsted (1777–1851) à l'Académie des Sciences. Ørsted a observé en 1819 que l'aiguille aimantée d'une boussole placée au voisinage d'un fil conducteur relié à une pile de Volta, était déviée lorsque le fil était en communication avec la pile. Cette expérience montre clairement qu'il existe une interaction entre les phénomènes électrique et magnétique. Ni Ørsted, ni Arago, ni les autres savants n'ont vraiment d'explication. Le 18 septembre 1820, dans un éclair de génie, Ampère va la fournir en sept jours ! Il part de l'idée simple qu'électricité et magnétisme sont la manifestation d'un même phénomène, et que le magnétisme est dû au phénomène électrique. Ampère crée ainsi l'électricité dynamique ou électrodynamique. Il montre, entre autres, que le phénomène est un flux électrique continu et non discontinu, et il est le premier à nommer ce flux « courant » électrique. Il introduira également les notions de tension électrique et d'intensité de courant.

La collaboration scientifique entre Ampère et Fresnel n'était pas à sens unique. Fresnel lui fera des suggestions. La plus importante porte sur la nature du courant électrique. Ampère pensait que les courants électriques sont macroscopiques et qu'ils circulent à la surface de l'aimant autour de son axe. Fresnel va lui soumettre l'idée de courants microscopiques qui se manifestent à l'intérieur de l'aimant

autour des particules métalliques de cet aimant. Ampère finira par adopter fin 1823 cette *hypothèse géniale et visionnaire de Fresnel*. On retrouvera deux notes de Fresnel de 1821, dans les papiers d'Ampère après sa mort, dont l'une porte « sur l'hypothèse des courants particuliers », c'est-à-dire de courants liés aux molécules de l'aimant et qui se manifestent au niveau intime de la molécule. On sait aujourd'hui qu'il s'agit des électrons des atomes.

Conclusion

Fresnel et Ampère ont ouvert la voie à la théorie de James Clerk Maxwell (1831-1879) qui unifie l'électricité, le magnétisme et la lumière, et qui conclut en 1864 que la lumière est une onde électromagnétique. Mais, en 1900, Max Planck réintroduit l'aspect corpusculaire en physique théorique, en considérant qu'à l'échelle atomique, l'énergie prend des valeurs multiples d'une quantité minimale qu'il appelle quantum d'énergie. En 1905, Albert Einstein (1879–1955) va avancer le concept de quantum d'énergie associé aux ondes électromagnétiques de la lumière, le quantum de lumière qui sera nommé photon en 1926, et il l'applique pour interpréter l'effet photoélectrique, inexpliqué par la théorie ondulatoire de la lumière. Pour Einstein, la lumière est duale, onde et particule en même temps. En 1924, Louis de Broglie, reprend l'idée de dualité d'Einstein et fait l'hypothèse géniale de la nature ondulatoire de l'électron, et il étendra cette idée à toute la matière.

Avec les ondes et l'électricité moderne, les travaux de Fresnel et d'Ampère ont traversé les âges. C'est leur amitié et leur véritable collaboration scientifique qui les ont aidés à faire face au scepticisme de leurs contemporains. Leurs découvertes ont ouvert de nouveaux champs de recherche et d'innovation. Elles sont à l'origine du formidable essor de l'industrie et contribuent, encore aujourd'hui, quotidiennement à notre bien-être. ■

Références :

- E. Amouyal, "Ampère and Fresnel: shedding light on two geniuses with shared destinies", in *"Impressionism between art and science. Light through the prism of Augustin Fresnel (From 1790 to 1900)"*, G. Mourou, M. Menu, M. Preti and E. Amouyal (Eds), Paris, Hermann Editeurs, 2020, p 53-79
- Robert Locqueneux, « *Ampère encyclopédiste et métaphysicien* », Les Ulis, EDP Sciences, 2008

L'auteur

Edmond Amouyal est directeur de recherche émérite au CNRS et à l'Ecole polytechnique (LSI). Il a été Chargé de mission Energie, Développement durable, Chimie et Procédés au Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, et Membre du Conseil d'Administration de l'ESPCI Paris entre 2009 et 2019. Ses recherches portent sur la spectroscopie laser, la photophysique et la photochimie, avec des applications pionnières au stockage de l'énergie solaire en hydrogène. Il a présidé la SCF Ile-de-France de 2008 à 2015. Il est membre des Sociétés savantes SFP, SCF, SEE et du Club Rodin.

Ampère, le « Newton de l'électrodynamique »



Hélène Fischer

Maîtresse de conférences en physique
Université de Lorraine

Dès 1802, Ampère a l'intuition fulgurante que magnétisme et courant électrique sont deux facettes différentes du même phénomène. En 1820, sa vie est bouleversée par les résultats d'Ørsted. Ampère est alors sujet à une véritable frénésie créatrice qui n'a de cesse d'expliquer ces résultats et de prouver la véracité de son rêve de jeunesse de refonder la physique.

À la fin du XVIII^e siècle, la conception de l'électricité est sujette à débats. Se côtoient plusieurs théories à un ou deux fluides électriques, et plusieurs approches privilégiant les actions de contact ou à distance, pour expliquer les phénomènes électriques. La théorie newtonienne, avec ses analogies formelles fortes entre les lois régissant gravitation, électricité et magnétisme, séduit et donne le sentiment d'un édifice inébranlable. Cette conception de la physique amène de plus à considérer tout phénomène comme une entité totalement indépendante des autres, ce qui interdit d'envisager quelque action réciproque entre « fluides électriques » et « fluides magnétiques » en particulier. Ainsi, les effets magnétiques de la foudre interpellent mais restent sans réponse.

Parallèlement à cela, au début de XIX^e siècle, émerge dans les pays germaniques un mouvement de pensée, la *Naturphilosophie*, qui propose une vision romantique de la nature. Localement, des scientifiques s'opposent à la philosophie newtonienne, et affirment l'unité profonde de la nature et des phénomènes observés, malgré leur diversité : ils supposent l'existence de deux forces fondamentales à l'origine de toutes les propriétés de la matière, se manifestant sous des formes différentes, et pouvant se convertir l'une en l'autre. Pas étonnant qu'apparaisse alors la possibilité d'une unité entre phénomènes électriques et magnétiques ! Mais les newtoniens ne manquent pas de considérer les partisans de cette conception du monde avec supériorité et mépris : le danois Ørsted (1777-1851), très influencé par la *Naturphilosophie*, est raillé quand il présente à Paris, en 1803, les travaux de Ritter (1776-1810) visant à démontrer l'identité de comportement entre une pile et un aimant. Il tire de cette mésaventure une exigence de rigueur scientifique issue de la démarche expérimentale.

Suite à l'invention de la pile par Volta (1745-1827), Ørsted propose une hiérarchie entre les diverses formes d'électricité : l'*électricité ordinaire*, l'*électricité galvanique*, et enfin le *magnétisme*. Persuadé que

seules les formes d'électricité aux activités voisines peuvent interagir, il a l'idée, en avril 1820, de rapprocher une aiguille aimantée d'un fil parcouru par un courant galvanique. L'observation de la déviation de l'aiguille n'étonne pas Ørsted, tant il est habité par la conviction profonde de l'unité entre phénomènes physiques. En juillet 1820, il publie sa découverte dans un Mémoire qui fait rapidement le tour de l'Europe.

En septembre 1820, le compte rendu des travaux d'Ørsted présenté par François Arago (1786-1853) à l'Académie des sciences est accueilli très froidement pour deux raisons : d'une part, en l'absence de notion de courant, impossible de comprendre que la pile sans le fil n'a pas d'effet sur la boussole. D'autre part, impossible d'accepter conceptuellement que l'aiguille puisse s'orienter de façon perpendiculaire au fil, et non longitudinale comme le prévoit la physique newtonienne ! Arago se voit alors contraint de reproduire l'expérience d'Ørsted à l'Académie. S'ensuivent alors de nombreuses expériences menées à travers l'Europe visant à approfondir l'observation d'effets « électromagnétiques », mais seuls Jean-Baptiste Biot (1774-1862) et André-Marie Ampère (1775-1836) tentent d'en rendre compte par des lois mathématiques. Ils produisent alors deux théories concurrentes : Biot, rejoint par de nombreux physiciens, pose l'hypothèse d'une aimantation temporaire du fil électrique, ce qui ramène l'inconnu, les courants galvaniques, au connu, les fluides magnétiques. La découverte d'Ørsted

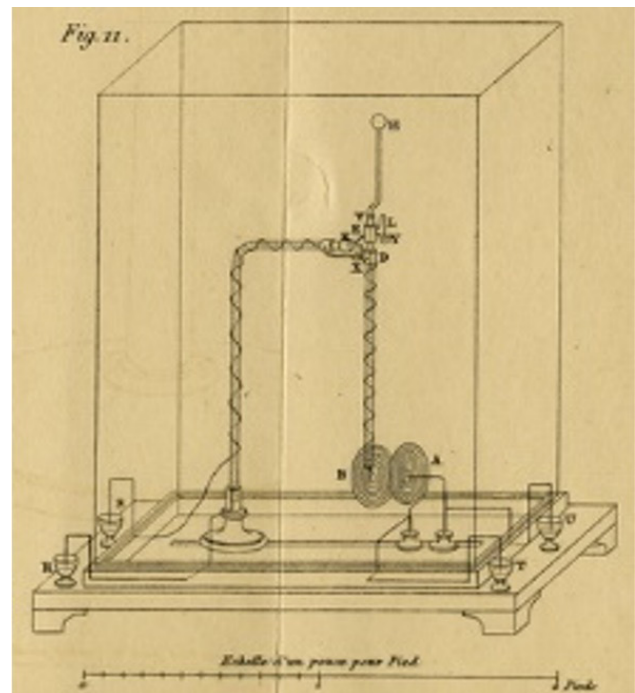
“ Pour convaincre la communauté, Arago se voit contraint de reproduire l'expérience d'Ørsted à l'Académie. ”

est alors réduite à une pure interaction magnétique expliquée dans le cadre de la théorie newtonienne. Au contraire, Ampère imagine que le magnétisme terrestre serait dû à des courants électriques internes responsables de l'orientation de la boussole. Il conjecture l'existence de courants dans les aimants et suppose des interactions entre courants électriques. Mais comment expliquer une telle intuition fulgurante ?

Depuis sa jeunesse, Ampère, autodidacte passionné, est influencé par la philosophie romantique germanique. Dès 1801, il publie un grand mémoire visant à unifier électricité et magnétisme : il veut alors refonder la physique en imaginant un fluide remplissant tout l'espace, et une attraction unique et universelle pour expliquer les divers phénomènes physiques. En septembre 1820, Ampère voit dans l'expérience d'Ørsted l'expression de sa conviction profonde, et l'occasion d'écrire les lois mathématiques correspondantes, avec l'idée de passer ainsi à la postérité.

Pendant 5 mois, il entre alors dans une période de création frénétique pour justifier par l'expérience son intuition, et écrire une nouvelle théorie du magnétisme basée sur les actions entre courants. Avec une fougue incroyable, il conçoit alors nombre de dispositifs expérimentaux ingénieux, qui lui permettent de montrer qu'une spirale de courant se comporte comme l'image électrique d'un pôle magnétique, et que deux spirales parcourues par des courants se comportent comme deux aimants qui s'attirent ou se repoussent selon le sens des courants qui les traversent. Il imagine un aimant comme parcouru par des boucles de courants électriques macroscopiques dans des plans perpendiculaires à son axe. Puis, à partir de 1821, il croit plutôt à des courants particuliers, circulant autour de chaque particule de l'aimant, toujours d'axe parallèle à celui de l'aimant. Enfin, il définit la notion de courant électrique comme circulation du « fluide électrique » à travers un circuit dans son ensemble. Le célèbre bonhomme qui porte son nom établit le sens de l'action magnétique induite.

Simultanément, Ampère se met à la recherche d'une loi mathématique universelle exprimant l'action entre 2 éléments infinitésimaux de courant, d'orientation quelconque l'un par rapport à l'autre. A partir de certaines hypothèses qu'il justifiera ensuite, d'observations établies grâce à ses dispositifs expérimentaux ingénieux, de l'abandon de tout projet de mesures absolues au profit du développement de la « méthode du zéro », il formule une loi mathématique unifiant électricité et magnétisme, publiée en 1826 dans *Théorie mathématique des phénomènes*



■ L'expérience décisive : étude de l'interaction entre deux spirales

électrodynamiques, uniquement déduite de l'expérience, qui donnera ensuite naissance à la loi de Laplace.

Par le bouleversement conceptuel qu'elle induit, l'approche d'Ampère eut l'effet d'une bombe dans la communauté scientifique : d'abord rejetée en bloc, elle fera ensuite consensus grâce à l'acharnement d'Ampère. Les dispositifs qu'il a dessinés ne verront pas tous le jour, mais ils seront des objets de pensée qui lui permettront d'intriquer expériences qualitatives et formulations théoriques, toujours en quête d'une homogénéité logique entre le « jugement universel » de la théorie, et le « jugement particulier » de l'expérience, selon les expressions de G. Canguilhem. C'est cette démarche scientifique exemplaire qui permettra à Ampère d'établir une loi universelle unifiant électricité et magnétisme, et qui fera de la découverte d'Ørsted une révolution scientifique donnant naissance à l'électromagnétisme. ■

Références :

- Ampère, le « Newton de l'électricité » ?, Christine Blondel, Sabix n°37, p. 57 (2004).
- <http://www.ampere.cnrs.fr/> Christine Blondel et Bertrand Wolf.

L'auteure

Ancienne élève de l'École Normale Supérieure, agrégée de physique, docteure en physique, Hélène Fischer est chercheuse, membre de l'équipe *Nanomagnétisme et électronique de spin* à l'institut Jean-Lamour, unité mixte CNRS – université de Lorraine. Elle est animée par la volonté de partager la démarche scientifique avec le grand public. Elle est à l'origine de l'exposition « Magnétique » et de l'action « La fabrique du nanomagnétisme » présentées au Palais de la découverte en 2019-20. Elle est lauréate du prix Jean Perrin 2019.

L'unité ampère : de l'électrodynamique à la mécanique quantique



Wilfrid Poirier

Chercheur au Laboratoire national de métrologie et d'essais

L'auteur retrace l'histoire complexe et mouvementée des unités électriques depuis l'adoption du système métrique jusqu'à la révision historique du Système International d'unités (SI) adoptée en 2018.

La métrologie moderne est née de la Révolution française pour répondre à la demande des citoyens d'une uniformisation des unités afin d'améliorer les échanges scientifiques, industriels et commerciaux. La réponse à cet appel fut l'adoption du système métrique en 1793 sous l'impulsion de l'académie des sciences. Il marque un tournant vers des définitions plus universelles des unités. En 1875, la signature de la convention du mètre et la création du Bureau international des poids et mesures pour conserver les étalons de masse et de longueur, sonnent le début de l'internationalisation des unités. Mais, les unités électriques ne sont alors pas concernées.

L'électricité ne s'est en effet vue caractérisée par des grandeurs physiques qu'à la fin du 18^{ème} siècle. La grandeur « courant électrique » et les propriétés électrodynamiques sont découvertes en 1820 par André-Marie Ampère à la suite de l'expérience clef d'Ersted démontrant la déviation de l'aiguille d'une boussole orthogonalement au passage « d'électricité » dans un fil. C'est le point de départ d'innovations liées à l'électricité, produites par des ingénieurs et des inventeurs, qui vont stimuler une seconde révolution industrielle à la fin du 19^{ème} siècle. Porté par cette effervescence scientifique et technique, se tient à Paris en 1881, le premier congrès international des électriciens durant lequel sont définies les premières unités électriques. André-Marie Ampère étant reconnu comme le fondateur de l'électrodynamique, son nom est choisi pour désigner l'unité de courant : l'ampère est le courant produit par un volt dans un ohm.

Les définitions de l'ampère et des autres unités électriques évolueront au travers de nouvelles résolutions prises lors des successives conférences générale des poids et mesures (CGPM). En 1948, l'ampère devient l'unité électrique de base. Sa définition, fondée sur la force d'Ampère et la fixation de la constante magnétique du vide $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$, restera inchangée au sein du SI, lui-même établi en 1960, jusqu'en mai 2019. Par ailleurs, le volt est défini à partir du watt et de l'ampère, et l'ohm à partir du volt et de l'ampère en appliquant la loi d'Ohm. Cette définition de l'ampère est la première à être fondée sur la fixation d'une constante de la nature, ce qui lui rend plus universelle. Cependant, liée au newton, elle impose des réalisations des unités électriques fondées sur des expériences électromécaniques complexes. Ces dernières ne pouvant être mises en œuvre régulièrement, les unités électriques sont alors conservées à l'aide de bases nationales d'étalons matériels (résistances, piles Weston, référence à diode Zener) dont l'instabilité augmente les incertitudes de mesure.

Un progrès considérable dans la réalisation des unités électriques est venu de la mécanique quantique qui a notamment permis de comprendre les propriétés de transport des électrons. Deux effets quantiques ont vraiment révolutionné la métrologie électrique. L'effet Hall quantique, découvert par Klaus von Klitzing en 1980, se manifeste dans les conducteurs bidimensionnels à basse température (quelques kelvins) soumis à un champ magnétique par la quantification de la résistance transverse (Hall) aux valeurs R_K/i , où R_K est théoriquement égal à h/e^2 , h est la constante de Planck, e est la charge élémentaire et i un entier. L'effet Josephson découvert en 1962, se produit dans des jonctions séparant deux supraconducteurs soumis à un signal radiofréquence de fréquence f_J . Il se manifeste par la quantification de la tension aux valeurs $n f_J / K_J$, où K_J est théoriquement égal à $2e/h$ et n est un entier. Ces deux effets produisent des étalons de résistance et de tension universels dont la reproductibilité relative est meilleure que 10^{-10} . Cependant, la définition électrodynamique de l'ampère impliquait des déterminations de R_K et K_J en unités SI reposant sur des expériences électromécaniques ayant des incertitudes de mesure plus élevées de deux ordres de grandeur. Ce fut un des arguments majeurs de révision profonde du SI, outre la dérive temporelle de l'emblématique artefact du kilogramme.

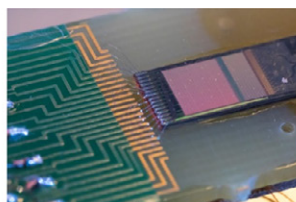
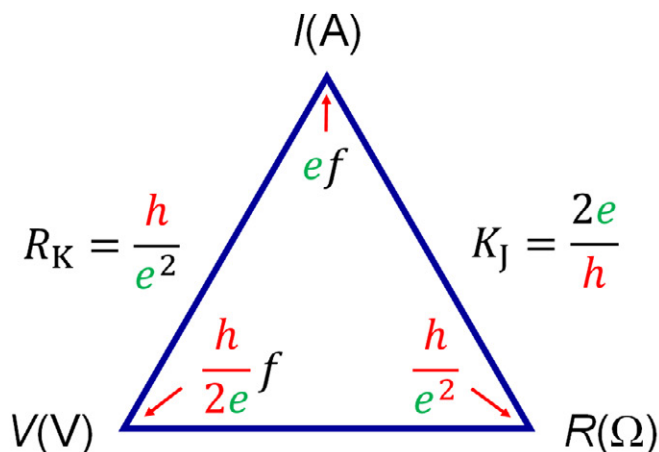
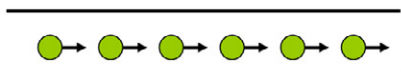
Le 16 novembre 2018 fut adoptée, lors de la 26^{ème} CGPM, une révision historique du SI (figure 1) fondée sur la fixation de sept constantes, dont h et e . Elle entérine les théories de la mécanique quantique et de la physique statistique [1]. L'ampère, symbole A, est l'unité de courant électrique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire, e , égale à $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ lorsqu'elle est exprimée en C, unité égale à A.s, la seconde étant définie en fonction

La constante de Planck, h , est égale à $6,62\,607\,015 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ ($\text{kg.m}^2.\text{s}^{-1}$)

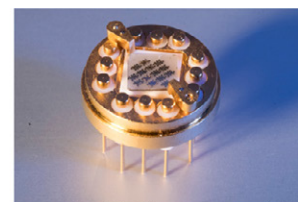


La charge élémentaire, e , est égale à $1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ (A.s)

$$I = ef$$



Réseau Josephson



Barres de Hall en graphène

SI révisé le 16/11/2018. Les relations des unités ampère, volt et ohm avec les constantes h et e . Photos des étalons quantiques de tension et de résistance.

de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ (fréquence de transition du césium 133). Les unités électriques [2], définies à partir des constantes h et e , peuvent donc être réalisées directement en utilisant les effets quantiques sans incertitude additionnelle. Grâce à la maîtrise croissante des outils nanotechnologiques, les étalons quantiques ont poursuivi leur évolution. Des réseaux Josephson fondés sur un grand nombre de jonctions en série, de 1 V puis de 10 V, ont pu être développés. De manière similaire, des réseaux de barres de Hall fabriqués à partir d'hétérostructures en arséniure de gallium ont permis d'atteindre des valeurs de résistance allant de $100\, \Omega$ à $1\, \text{M}\Omega$. Plus récemment, des étalons quantiques de résistance en graphène, monocouche d'atomes de carbone organisés selon un réseau en nid d'abeille, ont démontré pouvoir fonctionner à des températures supérieures ($> 4\, \text{K}$) et des inductions magnétiques inférieures (quelques teslas).

Depuis la révision du SI, l'intensité I d'un courant électrique exprimée en ampères peut s'écrire $I = ef$, où f est une fréquence. Deux voies de réalisation quantique de l'ampère ont été développées. La première vise la génération de petits courants (200 pA maximum) en exploitant un effet quantique de blocage électronique pour manipuler le passage des électrons un par un au travers d'un îlot de taille

nanoscopique. La seconde voie consiste à appliquer la loi d'Ohm aux étalons quantiques de résistance et de tension. Récemment, le LNE a développé un générateur quantique de courant fondé sur ce principe délivrant des courants allant de $1\, \mu\text{A}$ à $10\, \text{mA}$ quantifiés en termes du produit ef , avec une incertitude relative record de 10^{-8} , améliorant ainsi la réalisation de l'ampère de deux ordres de grandeur.

Les progrès des étalons quantiques apportent de nouvelles applications métrologiques : la réalisation du kilogramme à partir de h , la réalisation du kelvin et à plus long terme un calibrateur quantique universel réalisant le volt, l'ohm, l'ampère et le farad à partir des constantes h et e . Malgré la récente révision historique du SI, les découvertes d'André-Marie Ampère restent au cœur de ces nouveaux développements ! ■

Références :

- [1] Julien *et al*, Le nouveau Système international d'unités, *Reflète phys.* N°62 (2019) 11-31. <https://doi.org/10.1051/refdp/201962011>
- [2] W. Poirier *et al*, The ampere and the electrical units in the quantum era, *Comptes Rendus Physique* 20 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.crh.2019.02.003>

L'auteur

Ancien élève de l'ESPCI, Wilfrid Poirier a reçu son doctorat en physique du solide en 1997. Chercheur au LNE depuis 2001, il se consacre à la métrologie électrique quantique. Ses travaux ont concerné les réseaux de Hall, les étalons quantiques de résistance en graphène, les instruments de mesure de précision, et plus récemment la réalisation de la nouvelle définition de l'ampère. Il a reçu le prix LNE de la Recherche en 2018.

Ørsted, un précurseur de l'électromagnétisme¹



Laila Zwisler

Senior Executive Officer,
History of Technology, DTU (Denmark)

En 1820, le savant danois Hans Christian Ørsted découvre un phénomène nouveau pendant un cours en faisant passer un courant électrique au-dessus d'une boussole. Il observe que le courant provoque une légère déviation de l'aiguille aimantée. Ørsted mettait ainsi évidence un lien entre l'électricité et le magnétisme, un effet connu par la suite sous le nom d'électromagnétisme.

Cet article donne un aperçu de la découverte de l'électromagnétisme et les raisons pour lesquelles H.C.Ørsted menait des recherches sur ce phénomène. Sont également évoquées les réactions à cette découverte ainsi que la longue histoire de l'intégration de l'électromagnétisme dans notre vision du monde et dans nos technologies scientifiques. Ces avancées ont finalement fait de l'électromagnétisme un phénomène omniprésent dans notre vie quotidienne.

Avec cette découverte, Ørsted a ouvert la voie à de nouvelles connaissances et à de futures technologies mais bien sûr ces perspectives étaient inconnues à l'époque d'Ørsted ; cette découverte constitua un choc pour de nombreux chercheurs éminents, car elle allait totalement à l'encontre des théories en vigueur. Mais le personnage principal lui-même ne fut probablement pas surpris. Depuis un certain temps, Ørsted caressait en effet l'idée qu'un courant électrique pouvait interagir avec un aimant. Il en parle en 1812 dans son ouvrage intitulé « *Ansicht Der Chemischen Naturgesetze* »².

L'attente d'Ørsted concernant l'existence de l'électromagnétisme était également en accord avec la philosophie de vie qu'il professait. Ørsted était profondément inspiré par l'école romantique allemande de philosophie naturelle. Selon la philosophie romantique, la nature est un organisme vivant doté d'une raison profonde. Les romantiques pensaient qu'il existait une unité fondamentale dans la nature et que toute chose dans le monde était connectée. Pour Ørsted, des phénomènes tels que l'électricité et le magnétisme étaient des manifestations de cette unité. De nombreux romantiques étaient d'avis que le chemin de la connaissance passait par des processus internes et que les expé-

riences n'avaient aucune signification. D'autres, comme Ørsted, pensaient qu'une combinaison d'expériences et d'intuition était le meilleur chemin vers la vérité.

La vision romantique contrastait fortement avec la description mathématique de la nature, qui prédominait dans la physique du début du XIX^{ème} siècle, notamment en France. Le lien entre l'électricité et le magnétisme provoqua une grande surprise car les principaux scientifiques pensaient que l'électricité et le magnétisme étaient imputables à des types de particules totalement différents, qui ne pouvaient s'influencer mutuellement.

La vague romantique et les scientifiques français représentaient des cultures opposées de la connaissance et ne s'accordaient pas sur ce qui pouvait être considéré comme connaissance ou sur la manière dont la connaissance était créée. L'idée de faire appel aux sentiments et à l'intuition comme voie d'accès à la connaissance véritable n'avait guère cours à Paris, où les scientifiques préféraient acquérir une conviction par la preuve expérimentale et la rigueur mathématique.

Le scepticisme français

À Paris, la nouvelle de la découverte d'un effet électromagnétique par Ørsted fut accueillie avec scepticisme. S'agissait-il à nouveau d'un « rêve romantique », comme l'écrivit Pierre Dulong au chimiste suédois Jacob Berzelius ? L'effet électromagnétique ne fut accepté qu'après avoir été vérifié expérimentalement par François Arago.

Un certain nombre de scientifiques français, dont André-Marie Ampère, se lancèrent alors dans l'étude de ce nouveau phénomène. Au cours de cette exploration, Ampère eut l'intuition que le magnétisme provenait de courants électriques. Il construisit un dispositif dans lequel il observa que deux fils conducteurs de courant s'attiraient ou se repoussaient.

¹ Article traduit de l'anglais par la Rédaction.

² « *Vue sur les lois chimiques de la Nature* »



Portrait de Hans Christian Ørsted par C. W. Eckersberg (1822) © DTU

Ampère en déduit qu'il existe de minuscules courants électriques dans un aimant et que ce sont eux qui produisent l'effet observé, donc sans rapport avec le magnétisme. Grâce à un travail acharné, Ampère a ainsi jeté les bases de nombreuses théories ultérieures de l'électromagnétisme ainsi que le développement mathématique du domaine. Dans les années qui suivent, Ørsted rend visite à Ampère, mais il a des sentiments mitigés à l'égard de ses travaux et affirme que l'accent mis sur les mathématiques conduit à une image incorrecte du phénomène.

Ørsted et sa découverte ont acquis une grande notoriété et ont également suscité l'intérêt du savant britannique Michael Faraday. En 1821, Faraday découvre qu'un aimant et un fil porteur de courant peuvent s'enrouler l'un autour de l'autre, et dix ans plus tard, il découvre le phénomène de l'induction, c'est-à-dire qu'un aimant est capable de créer un courant électrique dans un fil lors du déplacement de l'un par rapport à l'autre. Ørsted lui-même a peu contribué aux travaux scientifiques sur l'électromagnétisme après 1820 car il avait sans doute trouvé ce qui l'intéressait. Mais la renommée qui accompagna sa découverte apporta à Ørsted un rayonnement tel qu'à son époque, il était considéré comme le principal scientifique du Danemark. Ørsted et l'effet qu'il avait démontré prirent alors des chemins séparés.

De la science à la technologie appliquée

La découverte de l'électromagnétisme n'était pas seulement une question de curiosité scientifique ou de philosophie. C'était aussi une question de technologie : au début des années 1800, la technologie prédominante de l'époque était la pile. Avec ces éléments galvaniques, on

pouvait produire un courant électrique assez constant. Les scientifiques s'intéressèrent donc fortement à cette nouvelle source d'électricité et des piles coûteuses furent construites. Dans ce foisonnement d'activités, l'électrolyse conduisit à la découverte marquante de nouveaux éléments chimiques. Ainsi, l'électricité fut plutôt considérée comme une avancée chimique et non pas physique.

Le magnétisme était un phénomène bien connu et on pouvait penser qu'avec tout l'intérêt porté à l'électricité, l'électromagnétisme allait suivre naturellement. Mais, par comparaison avec nos expériences actuelles, les piles étaient de faible puissance, compliquées à faire fonctionner et coûteuses. Par conséquent, détecter un effet électromagnétique supposait un effort soutenu. La pile utilisée par Ørsted, lors de la leçon qu'il prononça à Copenhague, était petite et coûteuse à faire fonctionner ce qui lui laissait peu de marge de manœuvre. De manière générale, Ørsted disposait de fonds limités. Il était souvent en butte à des difficultés financières et au début de l'année 1820, il était proche de la faillite si bien que ses recherches s'en trouvèrent entravées. Bien que soutenu financièrement par certains de ses amis, il devait trouver à la fois le temps et l'argent qui lui manquait pour examiner ses résultats de façon plus approfondie.

L'annonce de la découverte

Trois mois après sa conférence, Ørsted eut accès à une meilleure batterie et réunit un groupe d'hommes éminents pour assister aux travaux. Dans une série d'expériences systématiques, Ørsted développe alors l'électromagnétisme en explorant de nombreuses voies originales. Au cours de ses expériences, cet expérimentateur minutieux découvre que l'effet électromagnétique se produit au voisinage d'un fil électrique. Il prépare alors un opuscule en latin sur ses expériences et l'envoie aux scientifiques importants de l'époque. Dans cet opuscule, il décrit en détail le montage expérimental et les résultats, ce qui permet à d'autres de le reproduire facilement.

L'opuscule démontre clairement que les actions entreprises par Ørsted étaient non seulement compatibles avec les idées des romantiques mais aussi avec les idées de ceux qui pensaient que la connaissance devait être trouvée au moyen de la seule raison. Dans son travail scientifique, Ørsted cherchait la confirmation empirique de ses hypothèses dans le monde environnant. En tant qu'individu, Ørsted ne peut donc être rattaché à une seule culture de la connaissance, il a uni les idéaux des Romantiques à ceux des Lumières. ■

L'auteur

Laila Zwisler dirige l'unité « Histoire de la technologie » à l'Université technique du Danemark (DTU). Elle est responsable de l'héritage et de la collection historiques de DTU. Ses centres de recherche concernent l'histoire et l'héritage des établissements techniques universitaires, l'ingénierie et les technosciences. Elle enseigne aussi bien l'histoire des technologies que celle de la connaissance. Elle constitue une référence en ce qui concerne l'histoire de l'université du Danemark après avoir créé une large variété de produits de communication sur l'histoire de DTU.

Du bonhomme d'Ampère au Tokamak

Table ronde animée par : **Bernard Bigot**, Directeur général de l'organisation ITER

Avec la participation des intervenants :

- **Alain Bécoulet**, Directeur de l'ingénierie de l'organisation ITER, « Comment créer un courant de 15 millions d'ampères avec ITER ? »
- **Jean Daillant**, Directeur général du synchrotron Soleil, « D'Ampère au rayonnement synchrotron »
- **Daniel Verwaerde**, ancien Directeur général du CEA, « Z-pinch et fusion par confinement inertiel »

La table ronde a été constituée de trois exposés successifs, complétés chacun par quelques réponses aux interrogations des auditeurs. Les trois communications illustrent l'actualité contemporaine des lois fondamentales de l'électrodynamique, telles que formulées par Ampère, puis complétées par Gauss et Maxwell. Les trois interventions concernent des entreprises et des recherches de haute technologie, mettant en jeu des ressources humaines ou techniques considérables ainsi que des coopérations internationales.

Des enjeux sociétaux importants leur sont associés : la fusion nucléaire contrôlée sera-t-elle un jour la source d'énergie dominante de l'humanité ? Quelles seront les conséquences et applications de la connaissance plus intime de la matière ?

Comment créer un courant de 15 millions d'ampères avec ITER ?

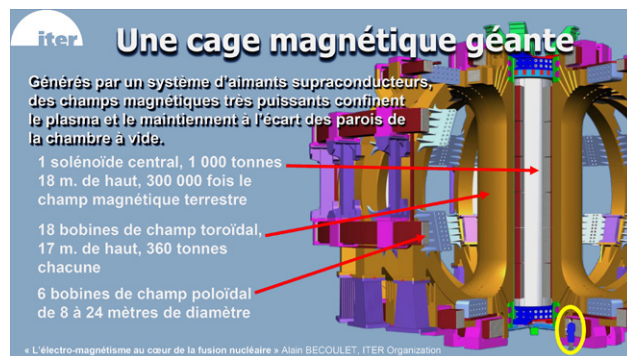
ITER est un projet coopératif international visant à démontrer la possibilité de production industrielle d'énergie électrique par fusion nucléaire contrôlée, en réalisant sur terre des réactions se déroulant dans les étoiles telles que le soleil. Ces réactions se produisant à des températures de l'ordre de 100 millions de kelvins, au sein de plasmas dans lesquels toute matière est totalement ionisée, le problème du confinement est essentiel.

Les lois fondamentales de l'électrodynamique, ainsi que la référence au bonhomme d'Ampère et à la force de Laplace sont à l'origine du confinement magnétique qui consiste à maintenir le plasma à l'intérieur d'un tore par un jeu de bobines parcourues par des courants : c'est le principe du Tokamak, étudié depuis 60 ans et qui a largement fait la preuve de son efficacité. Rappelons seulement que le tore agit comme un solénoïde fermé sur lui-même, dans lequel le champ magnétique est créé par une série de bobines toroïdales ; pour éviter la séparation dans le plasma des charges négatives (électrons) et positives (nucléons) et pour assurer la stabilité du plasma, des bobines supplémentaires sont indispensables, de symétrie axiale : une bobine centrale et des

bobines dites poloidales ; le champ magnétique global, autour duquel les particules chargées tournent, a la forme d'hélices fermées, confinées dans le tore.

Le combustible nucléaire choisi est constitué de deutérium et de tritium (les deux isotopes de l'hydrogène) qui fusionnent en produisant un noyau d'hélium et un neutron ; celui-ci emporte une énergie cinétique de 14,1 MeV, laquelle sera transformée, de façon "classique" en énergie électrique.

Diverses lois d'échelle imposent, pour que le bilan énergétique soit favorable, un gigantisme industriel dont les chiffres concernant les diverses bobines donnent une idée.



À titre d'exemple, les courants seront de 68 kA pour les bobines, ce qui impose d'utiliser des supraconducteurs : l'hélium liquide circulera à l'intérieur même des conducteurs. L'ensemble de la machine constituera un gigantesque cryostat, de la taille de l'Arc de Triomphe, produisant une quantité d'énergie nette avec tout autour, un vaste ensemble industriel comportant des installations électriques ou cryogéniques imposantes, sans compter la production possible d'électricité à partir de la vapeur d'eau qui évacuera l'énergie des neutrons... Le courant de plasma dépassera les 15 millions d'ampères !

L'assemblage a commencé en juillet 2020 avec, par exemple, des bobines réalisées sur place ; le premier plasma arrivera vers 2025 et, si ITER produit bien finalement 10 fois plus d'énergie que celle consommée, l'humanité bénéficiera vers le milieu du siècle d'une source d'énergie abondante et pratiquement illimitée... ■

D'Ampère au rayonnement synchrotron

- le synchrotron Soleil, installé sur le plateau de Saclay, constitue une source de rayonnement utilisé pour sonder la matière, dans un large spectre allant de l'infrarouge aux rayons X. Quatre conséquences du théorème d'Ampère, intégrées dans les équations de Maxwell, sont à la base de son fonctionnement :

- le champ électromagnétique se propage comme une onde, à la vitesse de la lumière.

- une charge accélérée produit une onde : dans Soleil, des électrons relativistes (d'énergie 2,75 GeV) en rotation dans un anneau de stockage, produisent ce rayonnement ; la théorie montre que l'accélération centripète produit un rayonnement tangentiel, vers l'avant, utilisé dans une "ligne de lumière" accueillant des expériences spécifiques.

- un aimant exerce une force sur un courant : cet effet est utilisé pour forcer le mouvement circulaire d'électrons préalablement accélérés (dans Soleil, par un accélérateur linéaire LINAC puis par un accélérateur circulaire baptisé BOOSTER).

- un courant est équivalent à un aimant : les électroaimants sont utilisés dans Soleil, même si la tendance actuelle est d'utiliser des aimants permanents.

L'anneau de stockage de Soleil a un diamètre de 120m... et le faisceau électronique la taille d'un cheveu. Les rayonnements, disponibles dans une vingtaine de bras de lumière, ont une brillance plus intense que celle du soleil et permettent une grande variété d'expériences résumée ci-dessous :

Rotations des molécules	25 μm - 1 mm	Infrarouge lointain
Vibrations des molécules	1-30 μm	Infrarouge
Phonons	0,01 - 0,1 μm	Diffusion inélastique
Déplacements chimiques	~ 100 nm	Photoémission
Transitions électroniques dans les solides	10 - 100 nm	Rayons X mous
Niveaux atomiques	0,1 Å - 1 nm	Rayons X durs

Des coopérations fort nombreuses rendent international et pluridisciplinaire l'environnement de Soleil. Les équipes accueillies à Soleil travaillent dans des domaines allant de la géophysique à l'archéologie, de l'agroalimentaire à l'astrophysique, de l'imagerie médicale à l'étude de l'environnement. A titre d'exemples

significatifs on mentionnera la découverte de l'hydrogène métallique (sous 4 106 atmosphères !), l'observation des vortex magnétiques (10^{-8} m) et ... l'étude des virus.

Z-pinch et fusion par confinement inertiel

Un Z-Pinch est un conducteur creux cylindrique dont le diamètre est de l'ordre du centimètre et les parois inférieures au millimètre. Il peut aussi être réalisé à l'aide de fils conducteurs ou d'un gaz conducteur. Le cylindre, parcouru par un courant intense produit une induction magnétique tangentielle : il en résulte, par référence au "Bonhomme d'Ampère" une force centripète qui tend à écraser le cylindre conducteur.

Sur cette géométrie, plusieurs dispositifs expérimentaux spectaculaires ont été imaginés puis réalisés :

- la machine de Sandia aux USA est sans doute la plus grande machine Z ; elle consiste à décharger plusieurs mégajoules d'énergie électrique, issus d'un banc de condensateurs chargés en parallèle (c'est un générateur de Marx). Avec une commutation de l'ordre de la microseconde, la puissance instantanée atteint 80 TW, soit 1000 fois la puissance totale disponible sur le réseau français ! Le courant atteint un maximum de 25 MA environ.

- un autre dispositif, proposé par A. Sakharov, consiste à obtenir la contraction par un dispositif d'explosion. Le cylindre conducteur de rayon r est placé dans une induction magnétique B constante, parallèle au courant ; le pincement génère un double effet : le courant induit s'oppose à la diminution du flux magnétique, ce qui entraîne une augmentation B' du champ total. La conservation globale du flux montre que, si le rayon final après explosion est r' , le courant est amplifié par un facteur $(r/r')^2 \times (1+B'/B)$. Les résultats obtenus par simulation ou par l'expérience (au CEA Gramat) sont complexes, car les puissances en jeu créent un plasma animé d'un mouvement centripète.

On envisage, grâce à la conjonction de deux expériences simultanées montées "tête bêche", de réaliser la fusion par confinement inertiel ; on concentre l'énergie sur une cible fusible constituée par un microballon contenant le mélange tritium-deutérium. L'enveloppe extérieure, brutalement chauffée (par une batterie de lasers), est projetée violemment vers l'extérieur et, par réaction, la densité de la partie centrale augmente fortement (d'environ un facteur 10^3) pour atteindre les températures nécessaires pour amorcer la fusion (de l'ordre de 10^7 K).

Tel est le principe du confinement inertiel et celui d'une possible fusion... mais ce sera, peut-être, le stade d'après celui des tokamaks et d'ITER ! ■

(Prise de notes et rédaction : Bernard Ayrault)

L'électricité dans l'automobile

Table ronde animée par : **Philippe Watteau**, Directeur général de l'Institut Vedecom

Avec la participation des intervenants :

- **Patrick Bastard**, Directeur de la Recherche de Renault, « De l'électrification des véhicules au stockage d'énergie »
- **Yann Vincent**, Directeur Général de Automotive Cells Company, « Accélérer la fabrication des batteries aujourd'hui en France et en Europe »
- **Florence Lambert**, Directrice Générale du CEA Tech Liten. « Les futures générations de batteries, de la R&D à l'industrie, dans une démarche écoresponsable »

La table ronde a été conduite sur la base d'échanges entre les intervenants qui ont évoqué l'ensemble des aspects de l'utilisation de l'électricité dans la mobilité aujourd'hui et des développements de techniques ou de produits qui en découlent. La part consacrée aux réponses aux nombreuses questions est restée limitée par le temps et certaines réponses ont été données dans les échanges/présentations. Les points-clé relevés par le rédacteur ont été regroupés suivant les principaux thèmes évoqués.

Introduction

- Le concept de l'utilisation de l'électricité existe depuis longtemps pour les accessoires automobiles
- Entrer dans la production de masse pour la motorisation électrique constitue une vraie révolution. Il faut peser sur le coût (le transport depuis l'Asie est prohibitif)
- De même les études de bilans CO₂ doivent être effectuées sur l'ensemble du produit en prenant en compte le couple conception / utilisation en vue de comparer les différentes filières ; faire une analyse du cycle de vie.
- Le problème de souveraineté est essentiel : la force de l'Europe est de posséder un système éducatif de haute valeur ; le programme de développement du véhicule électrique (VE) doit être en cohérence avec les besoins (écosystèmes).

Comment soutenir la concurrence ?

- Il faut s'organiser et synchroniser les opérations sans oublier les acteurs de l'innovation : travailler ensemble (« se serrer les coudes » entre chercheurs et industriels)
- Viser une compétitivité européenne sur la durée. Pour cela, créer des « hubs d'innovation » qui aillent de la preuve de concept jusqu'à l'échelle industrielle en raccourcissant les délais.
- L'industriel doit être accompagné par de la physique fondamentale (p. ex. lui ouvrir l'accès aux grands instruments) : éviter les années de recherche en labos isolés.

- La simulation est un véritable enjeu pour rendre le progrès plus rapide. Il faut accélérer le mouvement d'ensemble grâce à des feuilles de route évolutives intégrant dans l'usine le dernier état de l'art des technologies (*dry process*, batteries solides, ...)

- Mettre les intelligences en commun, ne pas se tromper d'options et protéger les résultats.

L'enjeu des batteries

- La batterie représente une part importante du coût de la voiture et sa conception est stratégique. Son développement bénéficie d'un support important des Etats français et allemand.
- Le projet batteries d'Automotive Cells Company met à profit la grande expertise produits et procédés de Total/Saft et de la production de masse chez PSA. ACC bénéficie d'un apport capitalistique depuis août 2020. Son Centre R&D est basé à Bordeaux avec l'usine pilote à Nersac en Charente. La production de la première *Gigafactory* est prévue en 2023, suivie d'une nouvelle usine chaque année.

Les innovations pour le véhicule électrique

Le passage au tout électrique est une problématique complexe : il ne s'agit pas seulement de remplacer un moteur thermique par un moteur électrique. Il faut concevoir pour trouver les solutions techniques tout en restant compétitifs !

- Motorisation : Le constructeur automobile doit-il se muer en motoriste électrique ? La réponse est OUI pour Renault car il faut se méfier des nouveaux entrants : les changements de technologie sont toujours une aubaine pour eux !

Sur le marché on trouve, pour des applications traditionnelles, des moteurs qui sont très différents des besoins de la mobilité électrique ou bien des moteurs dédiés (ferroviaire) mais en petites séries. Il faut donc une conception spécifique. Même si le moteur électrique présente des avantages intrinsèques évidents sur le moteur thermique, il faut l'optimiser en termes de coût, de performances (rendement) et de durabilité. Plusieurs technologies sont possibles.

- **Connexion au réseau électrique** : la connexion du VE pendant une partie importante de sa vie peut être un plus (c'est fonction du plan de charge). La perspective du *V to Grid* en fait un complément intéressant du développement des EnR. La bidirectionnalité est une possibilité à exploiter : avec 50% d'EnR dans le mix énergétique, 10% de bidirectionnalité permettrait de se passer de stockage électrique. La production décarbonée en France est évidemment un atout.

- **La standardisation** des prises de recharges est une question essentielle. Celle-ci est en cours mais la situation est encore imparfaite (badges multiples) et il faudra simplifier les moyens de paiement par l'utilisateur (*Plug and charge*) pour décharger le client de ce souci.

- Il faut continuer à implanter de nouvelles bornes à un rythme soutenu et traiter la question des batteries à recharge très rapide.

- **La charge par induction** pendant le déplacement est une alternative intéressante qui est traitée par des projets européens de grande ampleur impliquant les collectivités territoriales.

- **Electronique de puissance** : Cette question est moins connue du grand public mais c'est aussi un challenge important au niveau de 3 éléments-clé de la filière : le chargeur, l'onduleur et le convertisseur CC. L'objectif est de concevoir des objets qui soient compatibles avec une production de masse ; construire une véritable filière en Europe.

Plusieurs stratégies sont possibles (Renault par exemple conçoit certains de ces dispositifs) mais il faut noter que ce créneau constitue une vraie chance pour les produits européens.

De grands labos en Europe (dont le CEA) qui possèdent une bonne compétence en composants de puissance peuvent constituer l'amorce d'une filière européenne.

Le recyclage des batteries : l'économie circulaire est-elle en route ?

- ACC n'a pas encore intégré cette activité à son programme, la priorité aujourd'hui étant le déploiement d'usines pour asseoir la souveraineté européenne. Mais le recyclage deviendra une activité critique en particulier pour l'approvisionnement en matières. En 2035, on atteindra un flux de batteries à recycler équivalent au flux de production !

- Faire évoluer les composants pour permettre une deuxième vie de la batterie : démontabilité recherchée, *smart cells* intégrant l'histoire de la cellule.

- Dans le design des cellules on intègre le concept de recyclabilité : viser 95 % grâce à l'expertise apportée par les chimistes. Il faut en

particulier réduire la dépendance au cobalt pour les batteries (marché sensible à la situation géopolitique de certains pays).

- Plusieurs feuilles de route concurrentes coexistent actuellement. Les priorités sont plus d'économie de matières et de meilleurs solvants.

- L'analyse du cycle de vie (ACV) chez Renault est prise en compte dès le début de la conception. Le débat actuel qui tend à minimiser les avantages du VE pousse à être plus rigoureux dans les calculs d'ACV.

- Il faut convaincre le public que la mobilité électrique sera bien meilleure que le moteur thermique au moins tant qu'on utilise une électricité suffisamment décarbonée

Quid de l'hydrogène ?

- Attention à ne pas opposer les technologies ! L'hydrogène pourra jouer un rôle sur certains aspects complémentaires de la filière VE : recharge intensive par exemple.

- Il trouvera peut-être plus son créneau d'applications pour le transport lourd, ferroviaire ou maritime et pour décarboner l'électricité européenne.

- Il peut présenter aussi de l'intérêt pour les pays en voie de développement, le modèle européen n'étant pas exportable partout.

Quelques réponses à des questions de participants

• Le réseau va-t-il supporter un afflux de VE ? Oui sans problème, même si la totalité du parc européen était électrique on aurait simplement besoin d'un supplément de production de 15 % d'électricité

• Que pensez-vous des cellules sodium-ion sur lesquelles travaille le CNRS ? C'est du long terme, on se situe à un TRL très bas.

• On parle de toit photovoltaïque sur VE. Que faut-il en penser ? On regarde, c'est une question essentiellement économique (quelle valeur ajoutée ?)

• La durée de vie des moteurs électriques sera-t-elle suffisante ? Oui ce type de moteur est très favorable à cet égard

• Va-t-on gagner en nombre de cycles des batteries ? On est déjà à mille cycles au minimum mais il vaut mieux parler en termes de MWh échangés avec le moteur.

• On parle du VE pour particulier mais le poids lourd est-il aussi concerné ? Il existe des expériences intéressantes de charge en roulant (Alstom) ou de recours à l'hydrogène. ■

(Prise de notes et rédaction : Alain Brenac)

Comité national Ampère 200 ans

Président : François Gerin

Secrétaire : Patrick Leclerc

Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication (SEE)

Société des amis d'André-Marie Ampère (SAAMA)

Académie des sciences - Académie des technologies

Société française de physique (SFP) - Fédération française de sociétés scientifiques (F2S)

Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation (MESRI)

Inspection générale de l'éducation, du sport et de la recherche (IGESR)

Union des professeurs de physique et de chimie (UdPPC) - Union des professeurs de classes préparatoires scientifiques (UPS)

Collège de France - Ecole polytechnique - Ecole Centrale Supélec - Fondation des Arts et métiers

Centre national de la recherche scientifique (CNRS) – Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) – CIREN - CIGRE

Ingénieurs et scientifiques de France (IESF) – Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

Union française de l'électricité (UFE) – Groupement des industries de la filière électronique française (GIMELEC) – SERCE

Ville de Lyon

Remerciements

Au nom du Comité national Ampère 200 ans, nous exprimons nos remerciements chaleureux à Madame Frédérique Vidal, Ministre de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, pour son haut patronage et pour le soutien de son Ministère ; nous souhaitons également marquer notre reconnaissance envers Monsieur Gérard Mourou, Prix Nobel de Physique 2018, et parrain des manifestations Ampère 200 ans.

Notre gratitude s'adresse aussi aux intervenants, organisateurs et aux nombreux bénévoles pour la Journée Ampère 2020 et toutes les manifestations organisées dans le cadre d'Ampère 200 ans, ainsi qu'aux mécènes sans lesquels celles-ci ne pourraient avoir lieu.



Pour toute information sur la commémoration Ampère 200 ans et la consultation des nombreuses ressources associées à cette opération, veuillez accéder au site :

www.ampere200ans.fr