Numéro 1
MARS - AVRIL - MAI 2023

REE

REVUE DE L'ÉLECTRICITÉ ET DE L'ÉLECTRONIQUE

ÉNERGIE | TÉLÉCOMMUNICATIONS | [illegible] | UTOMATIQUE | INFORMATIQUE

TIRÉ À PART DE LA REVUE REE 2023-1

CAHIER AZUR

La commémoration « Ampère 200 ans » à Lyon

© Nicku / Shutterstock

INTRODUCTION
PATRICK LECLERC : VICE-PRÉSIDENT SEE ET ADMINISTRATEUR DU MUSÉE AMPÈRE P.3

PREMIERE PARTIE :
AMPÈRE, LA PHYSIQUE ET LYON P.7

DEUXIEME PARTIE :
ÉLECTRONIQUE D'AUJOURD'HUI ET DE DEMAIN P.12

TIRÉ À PART DE LA REVUE REE 2023-1

SOMMAIRE

3 Introduction :
Patrick Leclerc

PREMIÈRE PARTIE :
Ampère, la physique et Lyon

7 André-Marie Ampère (1775-1836) : les facettes d'un génie tourmenté
Xavier Dufour

9 Le triangle Ampère-Clerc-Mollet ou la physique à l'Académie de Lyon (1800-1836)
Pierre Crépel

DEUXIÈME PARTIE :
Électronique d'aujourd'hui et de demain

12 L'électro-magnétisme au cœur de la fusion nucléaire : Du bonhomme d'Ampère au Tokamak
Alain Bécoulet

15 Futur de la mobilité et enjeux de la batterie électrique
Louis Roche

18 Les réseaux électriques de demain : enjeux et défis pour les systèmes électriques dans la transition énergétique
Hubert de la Grandière

21 Les mutations et les métiers futurs du monde de l'électricité pour une réindustrialisation dans le développement durable
Sébastien Chevalier

Introduction

La commémoration « Ampère 200 ans » à Lyon

La commémoration « Ampère 200 ans » avait débuté à Lyon en janvier 2020 par une soirée dans le cadre des rendez-vous du Maire du 2ème arrondissement de Lyon à l'Ecole ESME Sudria, qui jouxte la place Ampère qui venait d'être rénovée et où siège la statue du savant depuis 1888. Elle a été suivie en février 2020 par une séance grand public de l'Académie des sciences délocalisée à l'Académie des sciences, belles lettres & arts de Lyon associée à des conférences à l'ENS-Lyon.

Patrick Leclerc

Vice-président SEE
Administrateur du musée Ampère

Le programme initialement prévu sur 2020 a fortement été perturbé par la situation sanitaire et de nombreux évènements ont été reportés ou traités « à distance ». Finalement c'est fin 2022 qu'il s'achève avec une « Journée Ampère 200 ans » de conférences commémoratives à Lyon le mercredi 5 octobre en préfecture, sous l'égide de Monsieur Pascal Mailhos, Préfet de la Région Auvergne Rhône-Alpes, Préfet du Rhône, avec la venue exceptionnelle de Gérard Mourou, Prix Nobel de physique en 2018, parrain de l'événement Ampère 200 ans, et du Recteur Gabriele Fioni, Délégué pour l'Enseignement Supérieur, la Recherche et l'Innovation de la région académique Auvergne Rhône-Alpes, représentant Madame la ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, qui soutient Ampère 200 ans par son haut patronage.

Avec l'aide de la SEE et de la SAAMA, l'Académie des sciences, belles lettres et arts de Lyon et la section locale de la SFP ont contribué à la réalisation de cette journée qui restera marquée par :

• Le discours d'accueil [1] de Monsieur le Préfet Mailhos qui a donné le ton de l'après-midi, rappelant l'impact des découvertes d'Ampère et vantant la nécessaire culture scientifique ●●●

1 L'intervention de M. le Préfet Mailhos peut- être écoutée sur le site www.ampere200ans

Allocution de M. le Préfet Mailhos en présence de François Gerin, président de la SEE et du comité Ampère 200 ans.

indispensable pour le développement du pôle d'excellence pour attirer les jeunes, qui feront la France et l'Europe de demain, dans des métiers porteurs d'intérêt et d'avenir et actuellement en forte tension.

• La conférence sur la lumière extrême pour le bénéfice de la science et de la société par Gérard Mourou avec un développement des applications des lasers en particulier dans le domaine médical pour le traitement ciblé de tumeurs cancéreuses et les interventions de microchirurgie notamment de l'œil.

• Les allocutions de clôture de la journée, après les échanges avec la salle, où Gérard Mourou et Gabriele Fioni, représentant le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, ont réaffirmé l'importance des soutiens et des accompagnements, pour valoriser les disciplines scientifiques et en particulier la filière de l'électricité présente et indispensable au cœur de toutes les activités. Gabriele Fioni a ainsi témoigné de l'engagement des établissements d'enseignement pour préparer l'avenir en proposant des formations adaptées aux enjeux, propres à attirer les jeunes dans des métiers du futur, prometteurs et innovants.

Intervention de M. Gérard Mourou, prix Nobel de physique

Les conférenciers suivants ont présenté, dans le grand salon de la Préfecture de Lyon, des sujets variés traitant du passé avec un portrait d'Ampère et esquissant notre futur probable, devant près de 250 participants, enseignants, élèves ingénieurs, chefs d'entreprises, ingénieurs, chercheurs…

Il nous a semblé important de regrouper dans ce Cahier azur de la REE les conférences de cette journée symbolique ; leurs auteurs ont bien voulu en préparer les résumés, qu'ils en soient remerciés vivement.

Cette série de conférences avait été précédée, le matin, par une visite à pied, guidée par Bernard Pallandre, conservateur du musée Ampère, qui avait permis à une douzaine de visiteurs de découvrir « Ampère, sa vie et son passé lyonnais », au gré des lieux qu'André Marie Ampère a fréquentés à Lyon.

L'introduction des conférences, avec un bref rappel de la démarche Ampère 200 ans, a été faite par François Gerin, président du Comité Ampère 200 ans avec Alfonso San Miguel, président de la Section Rhône de la Société française de physique, et Georges Boulon, président de l'Académie des sciences, belles lettres et arts de Lyon.

Les conférences suivantes ont été présentées :

Pour la partie historique associée à Ampère :

• André-Marie Ampère* (1775-1836), homme de génie et homme de cœur, par Xavier Dufour, mathématicien et philosophe. Cette présentation a fait suite à l'évocation de la promenade découverte dans les rues de Lyon et au rappel du festival Ampère de juin 2022.

Les intervenants de la Journée autour du buste d'André-Marie Ampère.

• La physique à l'Académie de Lyon au temps d'Ampère* (1800-1836), par Pierre Crépel, archiviste de l'Académie des Sciences à Lyon.

**A noter que les textes de ces cahiers décrivant la vie d'André-Marie Ampère ont été limités car les fascicules déjà publiés dans la REE (numéros 2019-5 et 2021-2) abordent ces aspects dans le détail.*

Pour la partie sur l'électricité aujourd'hui et demain :

• « Du bonhomme d'Ampère au Tokamak : les différents procédés de fusion », par Alain Bécoulet, Directeur de l'Ingénierie à ITER, qui a également rendu un hommage émouvant à Bernard Bigot, Directeur Général d'ITER Organisation, hélas disparu en mai 2022.

• « Du moteur d'Ampère à la mobilité électrique », par Louis Roche, ingénieur à VERKOR, jeune et dynamique entreprise dont la R&D est faite à Grenoble et qui porte le projet de Giga-Factory de Dunkerque pour le développement des batteries bas carbone.

• « Les réseaux électriques de demain », par Hubert de la Grandière, Directeur général de SuperGrid Institute, qui décrit les enjeux de la transition énergétique et des énergies renouvelables avec les scénarios de développement de l'électricité, associés aux économies d'énergies. Ont été présentées les nouvelles répartitions production-consommation et, en conséquence, la nécessaire multiplication des liaisons en courant continu et la construction de stations de conversion courant continu/alternatif, développées en parallèle avec le réseau alternatif toujours présent et indispensable.

NOTA: Lors de la journée du 5 octobre, RTE, représenté par Hervé Philibert, Directeur au Service Exploitation Auvergne Rhône-Alpes, était également intervenu.

• En synthèse et en fil conducteur des présentations, « Les mutations et les métiers futurs pour une réindustrialisation dans le développement durable » par Sébastien Chevalier, Chef de service de la coordination des stratégies de l'enseignement supérieur et de la recherche, qui a présenté les hypothèses et les actions/financements pour réaliser le projet France 2030 porté par les trois ministères : le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, le ministère de l'éducation nationale et le ministère du travail, du plein emploi et de l'insertion.

Ce cahier azur fournit une synthèse de l'ensemble des interventions citées ci-dessus. Par ailleurs, l'intégralité des enregistrements et des présentations de la Journée est disponible sur le site www.ampere200ans.

Conclusion et perspectives

Le Comité national Ampère 200 ans a rassemblé 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. Il est important de rappeler, comme cela avait été fait pour la Journée Ampère en novembre 2020, qu'au-delà de la reconnaissance des talents et de l'œuvre même d'Ampère, cette commémoration vise à créer 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.

Cette commémoration Ampère 200 ans s'achève fin 2022 et le Comité national en a validé le programme final avec quelques échéances début 2023 dont en particulier la clôture effective qui sera marquée par un évènement à Paris au Collège de France. Cet évènement solennel prévoit la pose de la plaque Milestone IEEE Ampère associée à la présentation de la table d'expériences d'Ampère rénovée.

Au-delà d'Ampère 200 ans, les démarches prévues ou tournées vers les jeunes seront poursuivies, avec l'engagement de la SEE à être présente aux côtés des différents acteurs et à soutenir les actions. On peut citer en particulier les suites qui sont données à la table ronde du 24 février 2022 sur les métiers de l'électricité avec les actions pour valoriser les métiers et la filière de l'électricité. Les besoins dans le domaine sont énormes à tous les niveaux de qualification et il faut trouver tous les moyens avec les professeurs, en particulier des matières scientifiques, pour intéresser les jeunes, mettre en valeur les attraits associés à l'exercice des métiers, susciter des vocations pour préparer l'avenir... et éclairer leurs orientations professionnelles futures. ■

Pour avoir accès à toutes les revues SEE

L'adhésion donne accès à l'ensemble des revues numériques de la SEE.
Il n'est donc pas utile de souscrire d'accès numériques supplémentaire aux revues.

REE — Revue de l'électricité et de l'électronique

La Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE) est une revue au service des ingénieurs, chercheurs, enseignants, décideurs techniques et économiques intéressés par les secteurs de l'électricité, de l'électronique, de l'information et de la communication.

Connaître l'état de l'art des sciences et technologies dans ces domaines ainsi que leurs évolutions dans les différents domaines d'application permet au lecteur d'enrichir ses compétences et de rester en ligne avec l'actualité.

Paraissant cinq fois par an, la REE offre un large panorama de ces technologies présenté par les personnalités du monde de la recherche et de l'industrie les plus au fait des derniers développements.

Cette information est complétée par des rubriques d'actualité, des points de vue, des libres propos ou des entretiens sur les grands enjeux technologiques du moment et sur les faits marquants du domaine couvert par la revue.

On y trouve également régulièrement le programme des activités de la SEE, dont la REE est le principal organe d'expression.

L'année 2022 avec la REE ...

Abonnez-vous à la REE

La REE est une publication trimestrielle de la SEE

Choisissez votre formule d'abonnement pour 2023 :

Version papier
5 numéros : mars, mai, juillet, octobre, décembre.
Distribution postale

Version numérique
Accès aux publications numériques
ouvert pendant un an à compter de la date du paiement

Version duo
Version imprimée
+ version numérique

Accédez à la page d'abonnement

La Revue 3E.I

La revue 3EI suspend sa publication en 2023 pour réfléchir à l'amélioration de son contenu, afin d'être plus en phase avec les attentes de ses lecteurs. La reprise de la revue est prévue en 2024.

L'année 2022 avec La Revue 3E.I ...

Première partie : Ampère, la physique et Lyon

André-Marie Ampère (1775-1836), les facettes d'un génie tourmenté

Les fulgurantes découvertes d'André-Marie Ampère dans le domaine de l'électrodynamique ne doivent 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 et toujours philosophe, Ampère fut aussi un homme de cœur, sensible et mystique, dont la vie fut marquée par de cruelles épreuves.

Xavier Dufour

Professeur et ingénieur physicien

Une jeunesse romantique

Né dans une famille de soyeux lyonnais, Ampère grandit dans le cadre bucolique des Monts d'Or lyonnais et s'initie sans maître aux disciplines les plus diverses : lecteur de l'*Encyclopédie*, il dévore auteurs classiques, 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 la *Mécanique* de Lagrange. En 1793, son père est guillotiné au terme du siège de Lyon. Après une dépression, le jeune homme retrouve sa passion d'apprendre et compose même une langue universelle. A 21 ans, il rencontre Julie Carron qu'il épouse en 1799 et qui lui donnera un fils, Jean-Jacques, futur littérateur et académicien.

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. Désemparé, il fréquente de jeunes intellectuels amis, comme Pierre-Simon Ballanche et Claude-Julien Bredin. Ils fondent ensemble en 1804 un cercle de réflexion où l'on discute philosophie et religion.

Paris, entre science et philosophie

Nommé répétiteur de mathématiques à l'Ecole polytechnique en 1804, Ampère fréquente l'élite scientifique, 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, qu'Ampère s'efforce de compléter par une doctrine réaliste de la connaissance, afin de montrer que la science atteint bien la structure de la réalité physique. En même temps, 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 septembre 1820, il révolutionne en quelques jours le monde de la physique et fonde une science nouvelle, l'électrodynamique. Il synthétise ses travaux dans sa *Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience* (1826).

Entre-temps, le savant a accédé aux plus hautes fonctions académiques : professeur à l'Ecole polytechnique en 1807, Inspecteur général en 1808, membre de l'Académie des sciences à la section géométrie en 1814, professeur au Collège de France à la chaire de ●●●

La statue d'André-Marie Ampère, place Ampère à Lyon.

" Pour lui, si la philosophie permet de porter un regard synthétique sur l'activité de l'intelligence, c'est à la foi d'éclairer les questions ultimes. « *Je ne vois que des vérités, enseigne-moi la Vérité !* » écrit-il à Bredin. "

physique en 1824. Cette même année, il publie un long article d'anatomie comparée pour défendre les thèses de Geoffroy Saint-Hilaire.

Mais ce génie de l'abstraction est un passionné au tempérament instable. Son remariage en 1806 s'achève par une séparation, au moment où naît sa fille Albine. Dans ce contexte, Ampère traverse une crise religieuse et morale de douze années, dont on suit les méandres dans sa correspondance avec Bredin. Après avoir frôlé le suicide en mars 1814, il retrouve le chemin d'une foi apaisée en 1817. Pour lui, si la philosophie permet de porter un regard synthétique sur l'activité de l'intelligence, c'est à la foi d'éclairer les questions ultimes. « *Je ne vois que des vérités, enseigne-moi la Vérité !* » écrit-il à Bredin.

Les dernières années

A partir de 1829, Ampère 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. Elle sera publiée en 1834 avec son premier volume consacré aux « sciences cosmologiques » et en 1836 le second volume, posthume, consacré aux « sciences noologiques » (sciences humaines). En 1831, le savant héberge Frédéric Ozanam, étudiant en droit, qui témoignera de la bonté et du génie de son hôte : « *S'il pensa beaucoup, il aima encore davantage* ». 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* ». ■

L'auteur

Xavier DUFOUR, né en 1963, ingénieur physicien (ICPI Lyon), a passé une agrégation de mathématiques puis a préparé un doctorat de philosophie, soutenu en 2003 et intitulé : ***André-Marie AMPERE, Une philosophie de la connaissance.***

Il enseigne les mathématiques et la philosophie chez les Maristes de Lyon et intervient au Collège Supérieur de Lyon. Il a aussi enseigné la philosophie à l'Université catholique de Lyon. Parallèlement, il s'intéresse à l'enseignement de la culture religieuse et a publié divers ouvrages sur ce sujet.

Le triangle Ampère-Clerc-Mollet ou la physique à l'Académie de Lyon (1800-1836)

Ampère (1775-1836), personnage exceptionnel pour la physique, pour la pensée, n'est pas né de rien, il est utile de connaître son environnement pour le comprendre. Nous nous limiterons ici à ses relations avec l'Académie des sciences, belles-lettres et arts (ASBLA) de Lyon. Quelle était l'ambiance scientifique à Lyon avant 1804 ? Était-elle liée aux spécificités lyonnaises (métiers de la soie, teinture, absence d'université) ? A-t-elle eu une influence sur Ampère ? Comment y voyait-on les relations entre les différents domaines de la physique, celles entre les sciences et la philosophie ? Comment la théorie de l'électrodynamique a-t-elle été reçue à Lyon vers 1820 ?

Pierre Crépel

Académie des sciences, belles lettres et arts de Lyon

Fils d'un notable lyonnais, Ampère soumet son premier (court) mémoire à 13 ans. Il est nommé émule (disons stagiaire) lors de la reconstitution de l'Académie en 1800, puis titulaire lors de la réforme du 15 frimaire an XI. Mathématicien avant d'être physicien, il quitte Lyon pour Paris à l'automne 1804, sa dernière séance à l'ASBLA est celle du 7 août 1804. Émérite le 11 juillet 1809, il est peu présent en raison de son éloignement mais fait cependant de nombreux passages à l'Académie et y envoie des mémoires.

Physique et physiciens à Lyon

En 1800, certains domaines de la physique bénéficient d'une théorie stable (mécanique du point, astronomie, mécanique des solides et même des fluides - sauf viscosité -, optique géométrique, acoustique), alors que d'autres sont encore confus ou font seulement l'objet de théories naissantes, peu mathématisées (électricité, magnétisme, énergie, travail, chaleur, optique physique, rayonnements, capillarité, « chimie », météorologie).

L'ASBLA a des membres titulaires, des émérites, des associés et des correspondants (habitant à plus d'un « demi-myriamètre » de Lyon). La réforme de l'an XI a classé les titulaires selon diverses sections : Mathématiques pures (Roux, Bureaux-Pusy, Ampère) ; Astronomie (Tabard, Mollet) ; Physique générale et particulière (Potot, Petetin, Grognier) ; Chimie (Tissier, Gavinet) ; etc. Les académiciens ainsi classés ne sont pas forcément très versés dans les disciplines indiquées, il n'y a que quelques physiciens (au sens où nous l'entendons) dans les premières décennies du siècle. Nous allons présenter les deux qui sont les plus proches d'Ampère, plus âgés que lui : Joseph Mollet et François Clerc.

Joseph Mollet (1756-1829)

Avant la Révolution, Ampère a suivi certains des cours de Mollet, le seul vrai physicien de Lyon, surtout un expérimentateur. Il est au départ oratorien, professeur au collège de la Trinité à partir de 1775, puis à l'École centrale du département du Rhône (1796-1803), enfin au lycée et à la (peu active) faculté des sciences (1809). Nommé à l'Académie dès 1800, président en 1810, secrétaire ou adjoint pour les sciences de 1802 à 1825, il a à son actif de nombreuses publications et l'ASBLA conserve une grande quantité de manuscrits de lui [1] : mémoires, rapports, discours d'ouverture.

L'Almanach de Lyon pour 1785 annonçait : « *Il y a dans le Collège deux cours publics : un de Mathématiques qui commence à la Saint-Martin ; un autre de Physique expérimentale, qui commence à Pâques. Professeur, le Père Joseph Mollet.* » [2] Ce cours gratuit a lieu tous les ans de 1784 jusqu'à 1792, il renaît dans le cadre d'une école municipale (arrêté du maire du 3 octobre 1806) et dure quatre mois, du 1er mai au 1er septembre. Plusieurs de ses discours d'ouverture après la Révolution sont publiés : *De l'influence des sciences sur le commerce et les arts*, 26 avril 1808 ; *Discours sur la beauté de la lumière*, 2 mai 1811. L'auteur prend du recul par rapport à la science au sens étroit du terme, ainsi dans son premier discours sur la météorologie prononcé à l'Académie le 24 messidor an IX : « *à toutes ces questions, et à mille autres semblables la physique n'a fait jusqu'ici que des réponses vagues et insuffisantes ; elle a aujourd'hui quelques aperçus de plus mais elle est encore bien éloignée de pouvoir présenter une théorie complète ...* ». ●●●

1 On en trouvera une liste presque exhaustive dans le Dictionnaire de Dominique Saint-Pierre.

2 Nous conservons l'orthographe des originaux.

François Clerc (1769-1847)

Ampère a la plus haute idée de Clerc, témoin cet extrait de rapport du 21 messidor an XII : « *ce que je viens de dire ne peut donner qu'une idée imparfaite du mérite des deux ouvrages que j'étais chargé d'examiner. On ne peut bien les apprécier qu'en les méditant. mais j'aurai rempli mon but si j'ai fait entrevoir l'utilité et le succès des travaux de M. Clerc, et indiqué une partie des titres qui doivent lui mériter le suffrage de l'académie, et nous faire désirer de pouvoir le compter au nombre de nos correspondants.* » Clerc est d'abord professeur au collège/lycée de Moulins, puis à celui de Lyon. A l'Académie, il est nommé correspondant le 27 frimaire an XIII, titulaire le 1er juillet 1806, président en 1819. Il publie peu et s'occupe de mathématiques et d'astronomie, plus que de physique. Ses interventions dans ce domaine sont principalement des rapports originaux et critiques sur des mémoires (notamment d'Ampère ou de Mollet) ou sur des concours. Il mène une activité militante pour la restauration de l'observatoire du collège, endommagé par le siège de Lyon.

D'autres académiciens ont un rapport moindre avec la physique, citons : François Tissier (1737-1811), François Tabard (1746-1821), J.H.D. Petetin (1744-1808), Ennemond Eynard (1749-1837), Jean-Michel Raymond (1766-1837), Charles Henry Tabareau (1790-1866). Ils n'ont guère publié de recherches marquantes en physique, mais ils peuvent avoir quelque intérêt pour notre propos.

Les thèmes des mémoires

La physique n'est qu'une activité parmi d'autres à l'Académie, où les sujets littéraires sont majoritaires. Sauf pour les années 1800-1804, où on dénombre en tout une vingtaine de mémoires ou de rapports traitant de physique, il n'y en a guère qu'un ou deux par an ultérieurement et ils sont en général le fait de Mollet ou de Clerc. Ils concernent des domaines variés : météorologie, électricité, hydrodynamique pratique, astronomie, incendie de mine, thermomètre, congélation, vapeur d'eau, gnomonique. L'une des questions vedettes est « l'expérience de Lyon » (ou briquet pneumatique), dont la découverte est attribuée à Mollet et Eynard.

Un mot sur la réception par l'ASBLA des travaux d'Oersted et d'Ampère sur l'électro-magnétisme. Le 10 juillet 1821, Mollet lit un « Mémoire sur la décomposition de l'eau par la pile voltaïque », le termine en avouant qu'il n'a pas réussi à obtenir la déviation de l'aiguille aimantée (« avec les appareils de petites dimensions qui sont en mon pouvoir »). Mais le 30 août 1821, « sur la déviation de l'aiguille aimantée », il a surmonté les difficultés : « *Depuis ce tems j'ai vu cet effet curieux, et je suis même parvenu à le produire à volonté avec mes faibles moyens* ». « *M. Tabareau, officier du génie plein de connaissances et de talent, a fait construire à ses dépens un appareil moderne de grandes dimensions* » (zinc, cuivre, 7 pieds carrés), l'appareil ayant « *été monté pour la première fois chez le Docteur Eynard* ». Puis il ajoute : « *j'en suis venu à bout avec beaucoup moins* »… « *avec mes plaques quarrées de trois pouces de côté* »… « *mes disques dont la surface n'est pas même de deux pouces* ».

Les concours de physique

L'Académie lance chaque année des concours, parfois liés à la physique au sens large du terme. L'élaboration du sujet donne lieu à un débat. Dans son rapport pour le prix de l'an XI, Martin souligne « *l'inutilité de ces questions de pure théorie* », qui exaltent davantage l'imagination que la science, il propose « *une direction évidente vers le bien général de la société* » ; mais, en raison de l'existence à Lyon de sociétés de médecine, d'agriculture et de commerce, il estime qu'il ne faut pas des sujets trop pratiques et il en présente alors trois. Celui qui est retenu (les atterrissements du Rhône) a pour but de trouver des solutions face à toutes les « saletés » (dirions-nous) que le Rhône charrie à Lyon et qui gênent la navigation, les moulins, etc. Il a peu de succès, il n'est pas décerné, nous avons les avis et rapports d'Ampère et de Mollet. Cinq des concours lancés par l'ASBLA à cette époque traitent vraiment de ce que nous appellerions la physique : l'évaporation (1807), la congélation (1812), l'expérience de Lyon (1814), la météorologie (1823) et le rayon (ultra-)violet (1823).

L'auteur

Pierre Crépel, né en 1947, était chercheur CNRS en mathématiques (probabilités et théorie ergodique). Il s'est ensuite orienté vers l'histoire des sciences et notamment vers les éditions critiques et commentées d'œuvres de D'Alembert, de Condorcet et de savants contemporains moins connus. Il est actuellement archiviste bénévole de l'Académie des sciences, belles-lettres et arts de Lyon.

Conclusion

Sans nul doute, Ampère a été influencé par Mollet. On a fait de la physique à Lyon avant 1804, quand Ampère y était … mais n'en faisait pas. Il y a eu réticence des milieux lyonnais vis-à-vis des sciences non appliquées, mais les autorités municipales ont parfois encouragé la science. Mollet et Clerc étaient conscients de la précarité théorique des différents domaines de la physique, d'autres tel Tabareau un peu plus tard, ont souhaité proposer (un peu naïvement) d'unifier toutes les théories physiques. Laissons le mot de la fin à Mollet (dans son éloge de Tissier) :

« *Les bouches de la renommée qui s'ouvrent avec tant d'éclat pour les savants de la capitale, demeurent muettes pour ceux qui habitent loin de ce séjour privilégié. Leur savoir est ignoré: l'importance de leurs recherches est méconnue; et leurs concitoyens, leurs collègues même semblent n'oser applaudir à leurs succès. Ainsi leur vie se passe dans des travaux sans récompense, et parmi des occupations pénibles qui ne reçoivent aucun encouragement.* »

NOTA : Tant sur la vie d'Ampère que sur la physique à l'ASBLA, il existe une abondante littérature. ■

MAISON d'AMPÈRE

André-Marie Ampère (1775-1836), mathématicien, physicien, chimiste et philosophe, a passé sa jeunesse à Poleymieux au Mont d'Or.

Musée, lieu de rencontre et acteur du progrès des sciences et techniques

La Maison d'Ampère abrite le Musée de l'Electricité créé en 1931 ou sont présentés :

- des expériences sur l'électricité et le magnétisme,
- des ateliers-découverte,
- des machines et instruments retraçant l'histoire de l'électricité,
- des documents sur la vie du savant et de sa famille.

Grâce au développement et à la modernisation de ses équipements, la Maison d'Ampère accueille :

- des groupes scolaires (plus de 1000 visiteurs chaque année), pour une douzaine d'ateliers-découverte de l'électricité :
  - construction d'une pile,
  - mesure de consommation des appareils du quotidien,
  - utilisation d'un panneau photovoltaïque,
  - programmation d'un petit robot,
- des entreprises et associations pour des réunions (50 places),
- des expositions, des conférences, …

http://amperemusee.fr/

Présentant les avancées dans les énergies durables (éolien, solaire, hydroélectrique), la Maison d'Ampère s'intéresse aussi développement de la mobilité électrique.

L'ancienne borne de recharge sur le parking du musée sera remplacée, grâce à l'appui de la commune de Poleymieux, par la première borne de nouvelle génération de la Métropole de Lyon.

Avec le SEE, la Maison d'Ampère a conduit la célébration en 2020 du bicentenaire des découvertes d'Ampère en électrodynamique : notion de « courant électrique », les lois d'interaction entre courants et aimants.

- Avec la SEE, la Maison d'Ampère a conduit la célébration en 2020du bicentenaire des découvertes d'Ampère en électrodynamique : notion de « courant électrique », les lois d'interaction entre courants et aimants.
- La commémoration « Ampère 200 ans » a débuté à Lyon en janvier 2020.

Elle a permis de réaliser de nombreuses manifestations depuis plus de 2 ans malgré la situation sanitaire. Elle s'achève à Paris en avril 2023 avec une cérémonie au Collège de France où Ampère a occupé la chaire de Physique générale et expérimentale.

www.ampere200ans.fr

Deuxième partie : L'électronique d'aujourd'hui et de demain

L'électro-magnétisme au cœur de la fusion nucléaire

Du bonhomme d'Ampère au Tokamak

Dr. Alain Bécoulet

Chef du Domaine d'Ingénierie, ITER Organization

C'est dès 1920, que l'idée que des réactions de fusion de l'hydrogène sont à l'œuvre au cœur du Soleil et des étoiles voit le jour, dans les travaux de Perrin, Eddington, puis Bethe, Rutherford…

Principes de la fusion

Dans une réaction de fusion, deux noyaux atomiques légers se combinent, forment un noyau plus lourd et libèrent une grande quantité d'énergie par perte de masse. C'est vers la fin des années 1950 que les premiers travaux de recherche pour une utilisation pacifique des réactions de fusion verront le jour, déclenchant l'une des plus grandes aventures de coopération scientifique de l'Humanité.

La fusion peut être obtenue à partir de différentes combinaisons de noyaux légers. En l'état présent de la technologie, la réaction deutérium + tritium (les isotopes de l'hydrogène) est la plus accessible ; elle donne naissance à un noyau d'hélium et un neutron (figure 1).

Deux « voies » sont possibles pour obtenir cette réaction sur Terre :

- La voie « inertielle » : Le mélange D-T, enfermé dans une micro-cible, est comprimé par des faisceaux convergents (laser ou particules). C'est cette voie qui vient de donner lieu à un fait marquant du National Ignition Facility (Lawrence Livermore National Laboratory), avec un tir sur cible déclenchant environ une fois et demi plus d'énergie produite qu'utilisée (voir par exemple https://www.llnl.gov/news/national-ignition-facility-achieves-fusion-ignition).

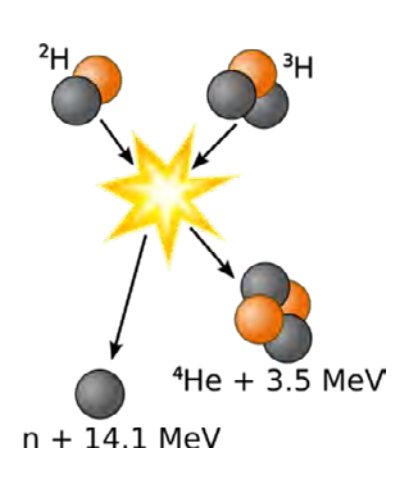


Figure 1 : La réaction de fusion deutérium-tritium.

- La voie « magnétique » : Le mélange D-T est confiné dans une bouteille magnétique puis chauffé à l'état de plasma au-delà de 100 millions de degrés. La configuration magnétique la plus prometteuse à l'heure actuelle est celle dite des « tokamaks ». A l'heure actuelle le tokamak le plus performant est le JET (opéré par UKAEA à Culham (UK) pour le compte de l'Europe). Il a récemment produit 59 MJ d'énergie de fusion, et validé une fois encore les paramètres de dimensionnement du réacteur international expérimental ITER, en cours de construction actuellement.

La voie magnétique

Dans cette voie magnétique, pour que des réactions thermonucléaires puissent se produire dans un plasma, il faut donc contenir les noyaux et les électrons dans un volume limité, et les maintenir à une température d'environ 100 millions de degrés, en les empêchant de céder trop directement leur chaleur à une paroi matérielle, qui ne ●●●

> **" C'est vers la fin des années 1950 que les premiers travaux de recherche pour une utilisation pacifique des réactions de fusion verront le jour, déclenchant l'une des plus grandes aventures de coopération scientifique de l'Humanité. "**

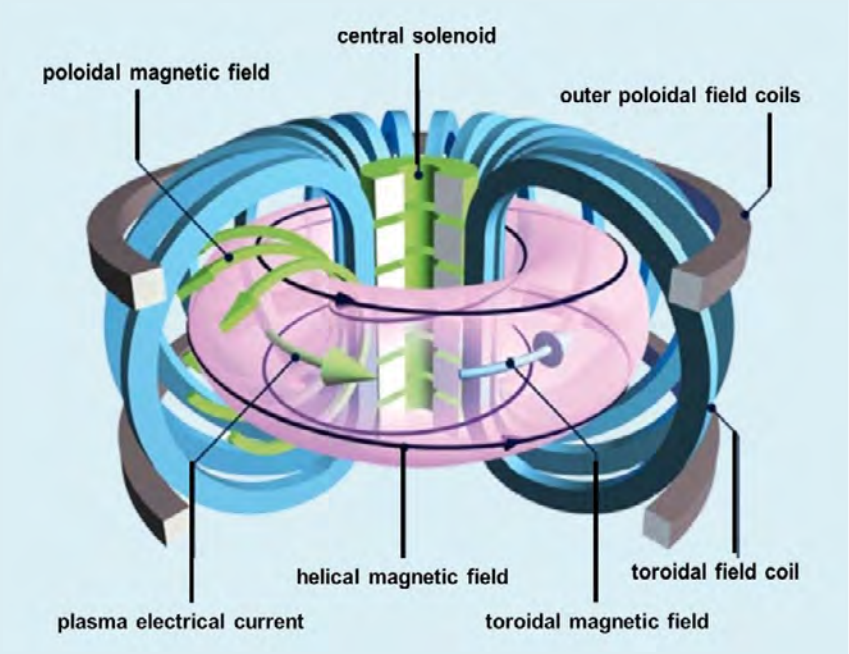


Figure 2 : La configuration Tokamak.

pourrait pas résister à de telles températures. Les particules chargées du plasma (noyaux et électrons) sont sensibles au champ magnétique. Si le plasma baigne dans un champ magnétique rectiligne, ses particules tourneront autour des lignes de champ, et ne pourront pas atteindre les parois qui l'entourent. Afin d'éviter que le plasma ne s'échappe aux extrémités, on referme la boîte magnétique sur elle-même, pour former une cage torique. Le champ magnétique ainsi créé par une série d'aimants verticaux entourant le plasma est nommé *champ magnétique toroïdal*. Ce champ toroïdal n'est cependant pas suffisant pour assurer un confinement suffisant et un courant électrique toroïdal intense doit encore parcourir le plasma, générant un second *champ magnétique dit poloïdal*, qui parfait alors le confinement.

Le champ magnétique toroïdal est créé par des bobines verticales qui entourent la chambre plasma (en général, elles sont au nombre de 16 ou 18), et le courant plasma par la décharge du flux magnétique contenu dans un solénoïde placé verticalement au centre de l'anneau. D'autres bobines horizontales sont ajoutées afin de démarrer le plasma et contrôler sa forme (figure 2).

Les lignes de champ résultant ont finalement une forme d'hélice, c'est la configuration Tokamak (Tokamak est un acronyme dérivé de l'expression russe : Тороидаль'ная Камера и Магнитная Катушка, i.e. chambre toroïdale et bobine magnétique).

Plus de 60 ans de recherche et développement ont été nécessaires pour mettre au point, étudier, comprendre puis extrapoler le comportement et les propriétés des tokamaks, au travers de collaborations internationales toujours croissantes. La fin du XXe siècle a vu la confiance dans les lois d'échelles d'extrapolation suffisantes pour envisager la construction du premier tokamak, intégrant la physique et l'ensemble de toutes les technologies nécessaires et suffisantes pour envisager d'atteindre des plasmas de fusion stables, amplifiant une dizaine de fois la puissance qui sert à les chauffer par le biais des réactions de fusion deutérium-tritium.

" Plus de 60 ans de recherche et développement ont été nécessaires pour mettre au point, étudier, comprendre puis extrapoler le comportement et les propriétés des tokamaks, au travers de collaborations internationales toujours croissantes. "

Le tokamak ITER

Ce point de fonctionnement est plus précisément d'obtenir 500 MW de puissance fusion d'un plasma chauffé par 50 MW de puissance extérieure, et ce pendant plusieurs centaines de secondes, et de manière répétitive.

L'auteur

Le Dr. **Alain Bécoulet**, Chef du Domaine d'Ingénierie d'ITER Organization depuis 2020, est un expert reconnu de la fusion nucléaire. Ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure de Paris, il est devenu Professeur Agrégé de Physique en 1986 et a terminé son doctorat au CEA (Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives) en 1990. Avant de rejoindre ITER, il a été directeur de l'Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique (CEA/IRFM) (2011-2020), directeur de recherche au CEA (2009-2020), et a dirigé plusieurs groupes de recherche européens sur la fusion contrôlée. Il est l'auteur de «L'Energie de Fusion» (Odile Jacob, 2019) et Chevalier de l'Ordre national du Mérite.

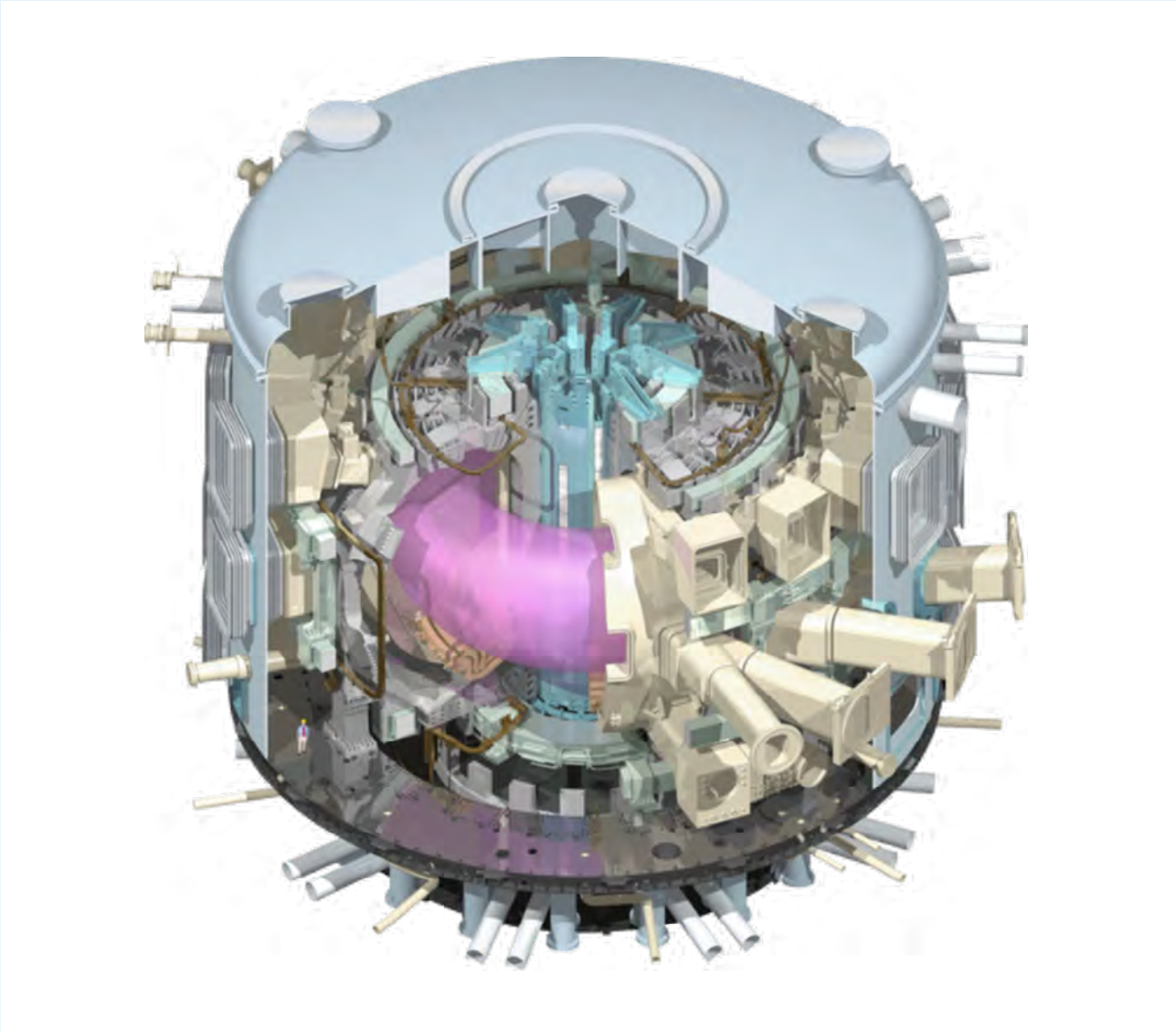


Figure 3 : Le Tokamak ITER.

C'est l'objectif affiché du tokamak international ITER en cours de construction sur le site français de Cadarache (Bouches-du-Rhône), sous l'égide d'un traité international liant la Chine, la Corée du Sud, les Etats-Unis d'Amérique, l'Europe, l'Inde, le Japon, et la Russie depuis 2006 (figure 3). Les sept Membres d'ITER représentent plus de 50 % de la population mondiale et 85 % du PIB de la planète.

ITER doit démontrer la maîtrise de l'ensemble des technologies et de la réglementation nucléaire, requises par un réacteur de fusion. Une fois "allumé", le plasma deutérium-tritium doit générer 10 fois plus d'énergie qu'il n'en aura reçu.

En parallèle à la construction des bâtiments et services débutée en 2012, le tokamak ITER est en cours d'assemblage sur le site de Cadarache depuis mi-2020. Le planning actuel du projet prévoit d'atteindre la performance finale dans le milieu des années 2030, et d'exploiter les capacités de la machine jusqu'en 2042, date actuelle de la fin de l'accord international. On constate des difficultés actuellement sur la fabrication de certains composants du tokamak, qui vont impacter la séquence d'assemblage, mais tout est fait à l'heure actuelle pour minimiser au maximum l'impact de ces difficultés sur le planning expérimental.

ITER est l'étape systémique indispensable pour ouvrir la voie aux réacteurs de fusion commerciaux. Des études de réacteur sont déjà en cours chez les différents Membres ITER, dans ce sens. On note également un vif intérêt de la part des investisseurs privés pour démarrer des études industrielles dans le même sens et accélérer autant que faire se peut la route vers ces réacteurs commerciaux. Une convergence de ces efforts, si elle se maintient ou même s'amplifie, doit pouvoir donner jour à une production significative et crédible d'énergie de fusion dans la seconde moitié de ce siècle. ■

Futur de la mobilité et enjeux de la batterie électrique

Louis Roche

Ingénieur, Société Verkor

Futur de la mobilité en Europe et en France : Horizon 2030

Dans la continuité des annonces faites durant la COP21 à Paris en 2015, l'Union Européenne s'est engagée en décembre 2019 dans un « Pacte vert pour l'Europe » (European Green Deal). Ce pacte « *pour une croissance qui donne plus qu'elle ne prend* » constitue la feuille de route pour « *faire de l'Europe le premier continent climatiquement neutre d'ici à 2050* ». Plus récemment et à plus court terme, les États membres de l'Union Européenne se sont fixé l'objectif contraignant de réduire de 55 % les émissions de gaz à effet de serre à horizon 2030 par rapport aux niveaux de 1990. Cette feuille de route comprend notamment un plan d'action pour « la mobilité durable et intelligente ». Dans le cadre du paquet « Ajustement à l'objectif 55 » présenté en juillet 2021 dans la continuité de ce pacte, la Commission européenne a en effet proposé de réduire les émissions de CO_2 des voitures neuves de 55 %, et celles des véhicules utilitaires légers de 50 % en 2030 par rapport à 2021. Plus marquant encore, elle vient de voter la fin de la vente des véhicules thermiques neufs pour 2035, ce qui signifie qu'à partir de 2035, toutes les voitures et camionnettes neuves immatriculées seront des véhicules électriques.

Pour atteindre l'objectif de neutralité carbone fixé par l'Accord de Paris, le secteur des transports a été identifié comme un levier majeur. Premier secteur émetteur de GES (gaz à effet de serre) en France, ce secteur représentait 31 % des émissions de GES sur le territoire national, et 22 % des émissions de l'Union européenne, en 2019. Ces mesures encouragent le développement de la mobilité électrique, alternative « propre » au véhicule thermique. En effet, le véhicule électrique à batterie apparaît aujourd'hui comme l'une des technologies les plus efficaces pour répondre aux enjeux de transition énergétique, puisqu'il n'émet pas de CO_2 lorsqu'il est utilisé, mais uniquement lors de sa fabrication et de la production de l'électricité qui servira à l'alimenter.

Le plan France 2030, annoncé par le Président de la République fin 2021 prévoit une production de véhicules électriques à l'horizon 2030 estimée à 2 millions d'unités en France, entraînant dans le même temps une demande équivalente ou supérieure en batteries. Cette prévision est cohérente avec le développement du marché de la batterie dans le monde dont Verkor fait partie, avec sa *Gigafactory* qui permettra d'équiper en batteries près de 300 000 véhicules dès 2025. Dans cette optique et face à une échéance temporelle très serrée, il est urgent de structurer une chaîne de valeurs pour répondre à cette problématique en impliquant tous les acteurs nécessaires.

Pourquoi la mobilité électrique ? Où va-t-on ?

Le développement de l'électrification des voitures particulières est essentiel pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de GES d'ici 2030 et de neutralité carbone d'ici 2050. Au cours du processus de fabrication, les automobiles électriques libèrent en moyenne le double de GES que les véhicules à combustion lorsque l'on inclut la production de la batterie. Cependant, l'utilisation à long terme des deux types de voitures montre une différence significative, avec une réduction moyenne de 50 % des émissions pour le véhicule électrique. Cette différence est encore plus marquée lorsque le véhicule est compact : une citadine entièrement électrique a une empreinte carbone trois fois plus faible que son équivalent à combustion interne pendant son cycle de vie, alors que le rapport pour les berlines est actuellement d'un à deux (figure 1).

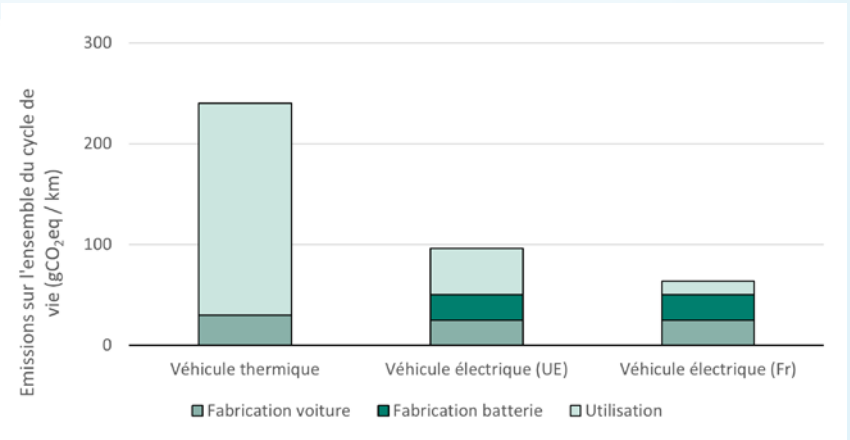


Figure 1 : Comparaison des émissions de CO_2 des véhicules thermiques et électriques sur l'ensemble de leur cycle de vie.

Figure 2 : Future Gigafactory de Dunkerque.

Cela introduit d'autres défis, notamment ceux liés à la production. La décarbonation de la production peut être accomplie par une relocalisation de la production qui tient compte de l'effet carbone du transport le long de la chaîne d'approvisionnement, ainsi que de l'utilisation de l'énergie primaire. C'est l'une des raisons pour laquelle Verkor a décidé d'implanter son usine en France, à Dunkerque (figure 2) : le caractère peu carboné du mix énergétique comme celui de la France, à faible teneur en carbone et compétitif, procure davantage d'autonomie industrielle, ce qui revitalise l'activité.

Par ailleurs, avoir une chaîne d'approvisionnement locale signifie avoir une production qui respecte les normes européennes ou même nationales, ce qui garantit un respect de celles-ci et une plus grande marge de manœuvre dans leurs évolutions.

Enfin, la relocalisation est identique à la décarbonation à bien des égards, depuis la fabrication et le raffinage des matières premières (qui ont des degrés de criticité variables), en passant par la création de composants de véhicules électriques liés à l'optimisation des processus jusqu'au recyclage.

Enjeux de la batterie bas-carbone pour le stockage stationnaire

L'intégration massive à venir des énergies renouvelables dans le réseau électrique va nécessiter des solutions de stockage de l'énergie par batteries, que ce soit par du stockage stationnaire ou par technologie *Vehicle-to-Grid* (figure 3). La forte croissance du marché des voitures électriques n'arrivant que vers la fin de la décennie, la technologie du *véhicule-to-grid* n'est pas encore très répandue. Cependant, 10 à 15 millions de véhicules électriques circuleront en France d'ici 2030, ce qui représente une quantité de batteries non négligeable qui pourra constituer une capacité de stockage d'énergie conséquente.

Ainsi, les batteries des véhicules électriques fourniront à l'avenir des solutions locales de stockage qui permettront d'intégrer au mieux les productions renouvelables décentralisées et non pilotables au mix énergétique français et européen. L'avantage de ce procédé est que le propriétaire du véhicule électrique pourra recharger sa batterie à un moment de la journée où les prix de l'électricité sont bas, et redistribuer la charge au sein de son logement lorsque les prix seront au plus haut. L'effet est ici double car lorsque l'utilisateur utilise l'énergie contenue dans sa batterie, il se retire du réseau et permet de diminuer la demande sur celui-ci durant ces heures.

En stockant l'énergie afin d'induire un décalage de temps entre production et consommation, le "*Véhicule-to-Grid*" représente une réelle opportunité pour une meilleure intégration des énergies non pilotables et lutter ainsi efficacement contre le changement climatique.

Objectifs et enjeux du recyclage

Un des enjeux forts de cette transition énergétique vers la mobilité électrique est le *sourcing* des matériaux critiques. Un fort aspect de cette transition énergétique réside dans la disponibilité des ressources mais également dans l'empreinte carbone de l'extraction, du raffinage, ou encore du transport de ces

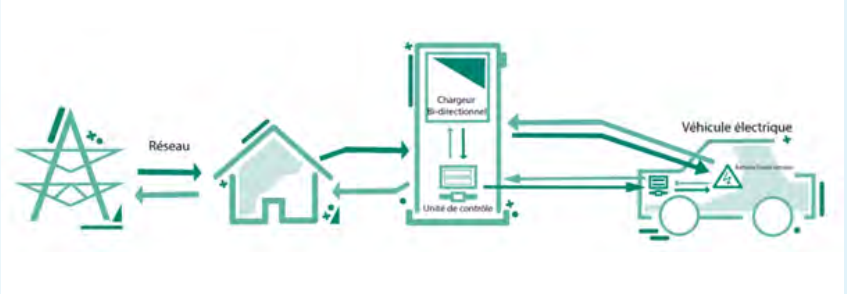


Figure 3 : Schéma de principe du «Véhicule to Grid» ou "Véhicule to Home ».

	Cobalt	Lithium	Nickel
2030	12%	4%	4%
2035	20%	10%	12%

Tableau 1 : Pourcentages de matériaux recyclés exigés dans les batteries neuves.

métaux vers les différents sites de production (de batteries par exemple). Également, et avec une importance tout aussi élevée, il s'agit de s'intéresser aux aspects sociaux et à la gouvernance liés à cet approvisionnement en matériaux. Dans cette optique-là, Verkor s'est associée à Bureau Veritas et Optel afin de mettre en place une solution de traçabilité efficace au sein de sa chaîne d'approvisuionnement. Cela permettra d'éviter, dans certains pays à risques, d'avoir à faire à des cas de comportements non éthiques. En Europe, l'ensemble de ces données devront prochainement être rassemblées dans le « *Battery Passport* » par les fabricants, qui permettra d'assurer une transparence sur la provenance et le contenu des cellules de batteries.

Pour ces raisons, le recyclage des batteries joue également un rôle important en faveur de la mobilité électrique, et particulièrement en Europe où les gisements de métaux sont limités. Il est ainsi nécessaire de réduire au maximum la dépendance aux autres continents, dès lors par exemple que la majorité des réserves mondiales de lithium se trouvent en Amérique du Sud dans le « Triangle du lithium » (Chili, Argentine, Bolivie), ou que plus de 65 % du cobalt mondial est extrait en RDC (République démocratique du Congo).

En Europe, le traitement et le recyclage des batteries en fin de vie est un impératif réglementaire : les constructeurs automobiles sont contraints de s'assurer que chaque batterie vendue sera bien collectée par une société de recyclage. Suite à la directive européenne « Batteries » de 2006, le recyclage d'au moins 50 % du poids total des batteries est obligatoire. Depuis 2020, un nouveau règlement européen, proposé dans le cadre du Pacte vert pour l'Europe, renforce les exigences environnementales et sociétales liées aux batteries. Ce projet de réglementation concerne les taux de métaux recyclés présents dans une batterie. Il prévoit notamment, dès 2027, des seuils maxima d'empreinte carbone à ne pas dépasser pour la mise sur le marché des batteries, ou encore des taux minima de matériaux recyclés dans les batteries neuves à partir de 2030 (tableau 1).

Le recyclage permet donc d'améliorer l'empreinte écologique de la voiture électrique, de limiter l'extraction des ressources naturelles, de sécuriser une partie de l'approvisionnement en métaux en limitant les besoins d'importation, d'optimiser les coûts de production et donc de diminuer le prix d'une voiture électrique. En effet, entre le recyclage des déchets de production et celui des batteries en fin de vie, l'Europe se donne ainsi accès à un gisement important de métaux précieux dont l'origine et l'impact sont connus. C'est entre autres pour ces raisons que les producteurs de batteries, y compris Verkor, considèrent le recyclage comme une brique indispensable de leur *business model*.

En conclusion

Le contexte politique et économique actuel, au niveau mondial mais surtout au niveau européen, fait en sorte d'accélérer la transition vers la mobilité électrique. Le passage du véhicule thermique au véhicule électrique permet non seulement une réduction considérable des émissions de gaz à effet de serre, mais également une forte complémentarité avec le déploiement massif des énergies renouvelables, à travers le stockage stationnaire et le *vehicule-to-grid*. Ces aspects, couplés au développement de la filière du recyclage des batteries qui assurera la présence de matériaux locaux et donc plus vertueux, permettront à la France et à l'Europe de s'appuyer sur une mobilité locale et durable pour les temps à venir. ■

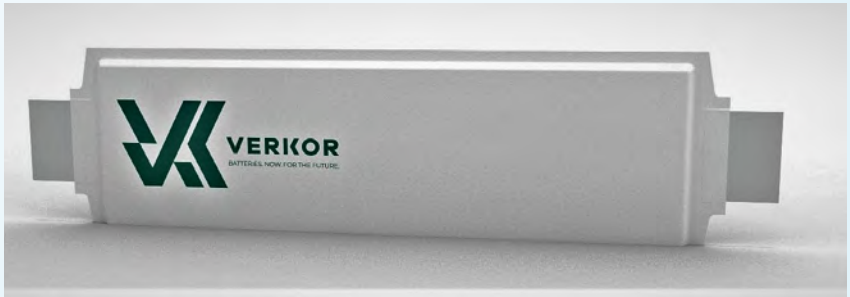
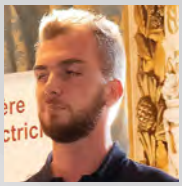


Figure 3 : Cellule de batterie - Format «Pouch».

L'auteur



Louis Roche a rejoint Verkor il y a maintenant près d'un an et demi après avoir été diplômé ingénieur de l'école Grenoble INP – Phelma, spécialisé en électrochimie, et avoir suivi un mastère spécialisé en management de l'énergie à Grenoble Ecole de Management. De l'estimation de l'impact environnemental des batteries, à la définition et mise en place de la stratégie de recyclage des déchets de production de batterie, en passant par la formation de nouveaux talents, Louis travaille sur des sujets relatifs au développement durable dont l'objectif est de faire de Verkor un leader de la batterie bas carbone en Europe.

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

Ingénieurs, chercheurs ou universitaires, impliqués dans les domaines rapidement évolutifs de l'énergie, des télécommunications ou des TIC, vous éprouvez un besoin de rencontre, de partage et de maintien des connaissances. Ouverte à tous, la SEE offre un cadre adapté pour cela.

Rejoignez-nous !

Avec ses **Comités techniques** et ses **Groupes régionaux**, les **congrès**, les **journées d'étude** et **conférences** qu'elle organise, la SEE offre des lieux de convergence où vous échangerez avec vos pairs, participerez à des manifestations scientifiques ou les organiserez. Sa **Revue de l'électricité et de l'électronique** (la REE) vous donnera une vision de synthèse sur des sujets variés et vous ouvrira ses colonnes.

Vos travaux pourront être reconnus par **des distinctions et des prix prestigieux**. Pour votre entreprise, c'est l'opportunité de traiter un ensemble de problématiques actuelles, souvent sensibles. Pour vous étudiants et votre université ou grandes écoles, la SEE offre une ouverture unique vers le monde de l'industrie.

Adhérez dès à présent

Les actions de la SEE :

› Fédérer la communauté scientifique et technique pour promouvoir la recherche, l'université, l'industrie et les sciences au profit d'un bien-être accessible à tous et durable.

Véritable **organe d'information professionnelle** à destination des Ingénieurs et Scientifiques, elle rend compte des technologies développées tant en France q u'à l'international.

Elle est le support d'un savoir-faire porté par des **publications à caractère scientifique et technique de haut niveau** (monographies, proceedings, REE, 3EI, fascicules et autres outils d'information).

La SEE est également propriétaire de **la Maison d'Ampère**, qui abrite le musée de l'électricité consacré à la Vie d'André-Marie Ampère et à l'évolution de l'électricité.

› Organiser des événements scientifiques ou professionnels

Seule ou en partenariat avec des organismes nationaux ou internationaux, la SEE suscite de nombreux échanges scientifiques et techniques en organisant de nombreuses manifestations (colloques, congrès, journées d'étude, soirées débats, formations, etc.) pour se rassembler et partager entre spécialistes autour des savoirs scientifiques, sur des thématiques qui ne cessent d'évoluer.

› « Ampère 200 ans »

Depuis 2020, la SEE, avec la SAAMA,rassemble les communautés scientifiques, industrielles et de l'éducation pour le 200ème anniversaire de la naissance de l'Électrodynamique dont André-Marie Ampère est à l'origine et qui ont apporté à tous progrès et confort matériel.

La SEE poursuit cette démarche pour susciter des vocations auprès des jeunes avec l'appui des professionnels et des enseignants pour :

- **Montrer l'importance prise par l'électricité** dans le monde moderne, sur les avancées que celle-ci permet d'obtenir dans la vie industrielle et la vie de tous les jours,
- **Présenter les enjeux pour le futur** avec les implications pour notre société et la **formation des jeunes** pour susciter des vocations vers des **métiers d'avenir**.

Le site Ampère 200 ans

Les réseaux électriques de demain

Enjeux et défis pour les systèmes électriques dans la transition énergétique

Hubert de la Grandière

Directeur Général SuperGrid Institute

Une évolution des réseaux électriques indispensable à la transition énergétique

En Europe comme en France, la décarbonation de l'énergie nécessite à la fois un recours plus important à l'énergie électrique (électrification des usages) et une décarbonation de la production de cette électricité. Les scénarios de décarbonation impliquent tous un usage croissant des sources d'électricité d'origine renouvelables. Compte tenu de l'éloignement de ces sources massives d'énergie renouvelable et de leur intermittence (jour/nuit, météorologique, saisonnière), la quantité d'électricité à transporter augmente intrinsèquement.

Cette augmentation des flux s'accompagne d'une intégration du marché de l'électricité en Europe. L'union européenne a fixé aux Etats membres des objectifs d'interconnexion des réseaux nationaux, ce qui contribue également à renforcer la stabilité du réseau électrique européen.

Un usage croissant du courant continu

Utilisé pour transporter de grandes quantités d'électricité sur de longues distances, le courant continu (DC) est de plus en plus utilisé, en particulier pour traverser par câble des obstacles naturels (mers, chaînes de montagne, parcs naturels). Ces liaisons sont réalisées en « point-à-point », un peu comme des « tunnels », avec une conversion du courant aux extrémités : du courant alternatif (AC) vers le courant continu (DC) ou réciproquement (figure 1). Elles servent ainsi à interconnecter des pays ou à évacuer l'électricité produite dans les fermes éoliennes *offshore* distantes – en mer du Nord par exemple.

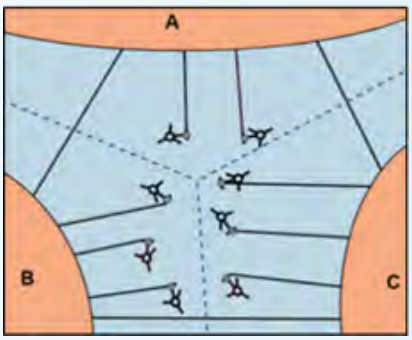


Figure 1 : Interconnections et raccordement de fermes éoliennes offshore– projet H2020 PROMOTioN – D12.4

Ces fermes éoliennes apportent sur les côtes des quantités considérables d'électricité à intégrer dans les réseaux nationaux. Son transport jusqu'au cœur des pays nécessite à terme de renforcer la capacité des réseaux de transport nationaux. C'est déjà le cas en Allemagne, où de grands corridors de puissance en courant continu ont été créés pour acheminer plus au sud l'électricité qui arrive sur les berges du nord du pays. Ces corridors viennent renforcer le réseau AC existant.

Ces besoins de renforcement ont été démontrés dans le cadre du projet européen e-Highway2050, qui illustre les capacités de transport à accroître dans les différents scénarios de production et de consommation (figure 2). En France, ces besoins sont mentionnés dans le rapport « Futurs énergétiques 2050 » publié par le gestionnaire de réseau Rte – sans préjuger de la façon dont ces renforts seront effectués.

Compte tenu de la difficile acceptation sociétale de nouvelles lignes aériennes, il est probable que ces renforcements mobilisent des empreintes déjà existantes (augmentation de la puissance grâce à des nouvelles technologies de conducteurs ou la migration de lignes de AC en DC) ou utilisent des câbles ●●●

"Utilisé pour transporter de grandes quantités d'électricité sur de longues distances, le courant continu (DC) est de plus en plus utilisé, en particulier pour traverser par câble des obstacles naturels (mers, chaînes de montagne, parcs naturels)."

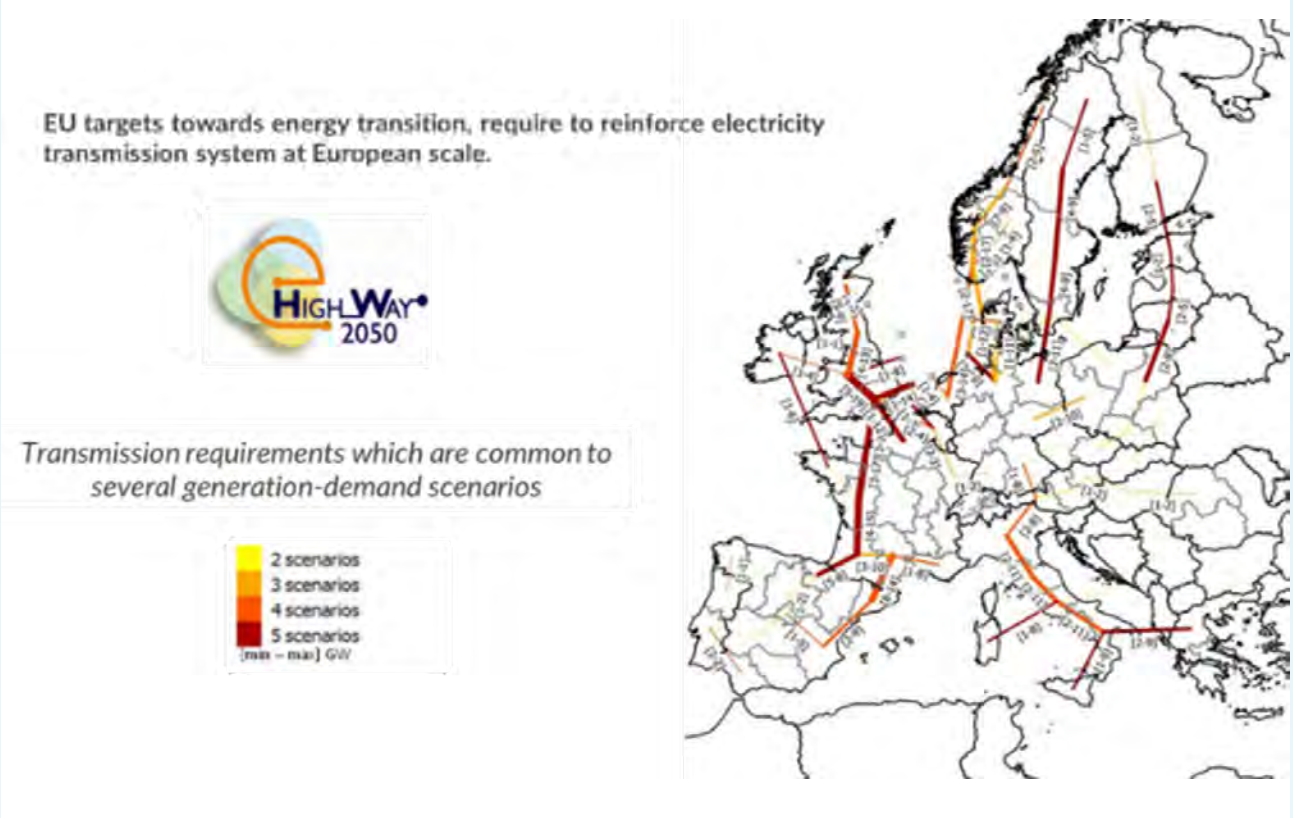


Figure 2 : Carte illustrant les renforcements communs aux différents scénarios (Projet e-Highway2050 : D2.3 – System simulation analysis).

souterrains, en DC voire en technologie supraconducteurs. Sans en être le seul vecteur, les liaisons DC auront un rôle certain dans ces renforcements de réseau.

L'émergence des réseaux DC Multi-Terminaux (MTDC)

Multiplier des liens DC en « point-à-point » successifs ou juxtaposés est loin d'être optimal. Ce serait un peu comparable à une succession de tronçons d'autoroutes distincts, avec leurs deux péages et un passage par une nationale entre chaque tronçon. Un réseau d'autoroutes vient adéquatement en renfort du réseau de routes nationales lorsqu'il a plusieurs entrées, plusieurs embranchements, plusieurs sorties. De façon similaire, le réseau électrique AC existant peut-être renforcé par des réseaux multi-terminaux DC, à plusieurs entrées et plusieurs sorties, qui permettront d'optimiser l'infrastructure : moins de câbles, moins de convertisseurs, une redondance possible pour plus de résilience.

Cette évolution est déjà en marche. Le consortium *North Sea Wind Power Hub* (NSWPH) propose une infrastructure de type « *hub-and-spoke* » : au lieu de relier les fermes éoliennes offshore directement à la terre ferme, elle les connecte à des îlots de puissances, eux-mêmes raccordés entre eux et évacuant l'électricité produite vers les pays voisins – optimisant à la fois les besoins de câblage, de convertisseurs et les échanges entre pays (figure 3).

C'est aussi déjà une réalité en Chine, avec l'émergence de réseaux terrestres DC pour partager des réserves et contribuer à stabiliser le réseau AC. On peut citer le réseau qui relie les régions de production éoliennes de Zhangbei et Kangbao et de production et stockage hydraulique de Fengning à la région de Pékin, qui a

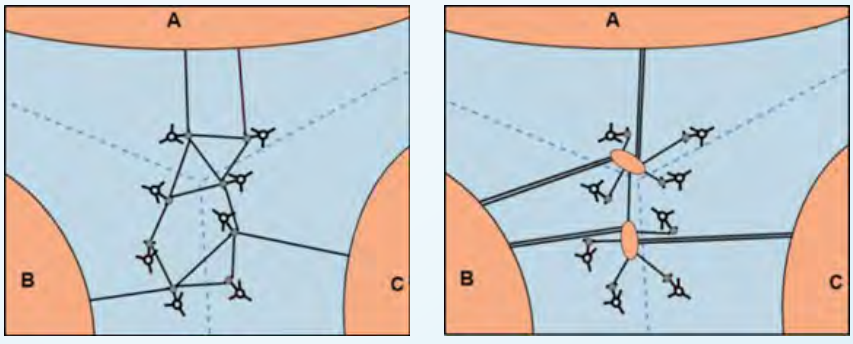


Figure 3 : Topologies de multi-terminaux décentralisés (à gauche) et de « hub-and-spoke » (à droite) (projet H2020 PROMOTioN – D12.4).

> **"Multiplier des liens DC en « point-à-point » successifs ou juxtaposés est loin d'être optimal."**

échangé ses premiers électrons en juin 2020 (figure 4).

Pour se préparer, l'Union européenne a engagé deux projets Horizon Europe majeurs qui réunissent de nombreux opérateurs de réseaux, des fabricants et des centres de recherche :

- Le projet HVDC-WISE, sur la fiabilité et la résilience des réseaux multi-terminaux à courant continu.

- Le projet InterOPERA, sur la standardisation nécessaire pour faire fonctionner un réseau construit avec des convertisseurs issus de fabricants différents.

L'institut de transition énergétique SuperGrid Institute, à Villeurbanne (Lyon), est le coordinateur de ces deux projets européens d'envergure.

A quoi ressemblera le réseau de demain ?

Ce sera vraisemblablement une infrastructure majoritairement AC hybridée avec du DC, qui contribuera à gérer les flux croissants d'électricité et à apporter des services systèmes de stabilisation et de flexibilité du réseau. Des sources d'énergies renouvelables massives seront raccordées à ce réseau de transport.

Figure 4 : Projet multi-terminaux Zhang-Bei en Chine - 3000MW, 500kV DC © NR Electric Co., Ltd.

Bien sûr, il y aura aussi de plus en plus de génération diffuse ou de stockage raccordés sur le réseau de distribution. Les deux sont complémentaires et il ne faut pas les opposer. Le réseau de distribution contribuera à la stabilité du réseau de transport, par exemple en mutualisant l'inertie ou le stockage qu'il contient. Et le réseau de transport partagera ses réserves centralisées – ou distribuées sur d'autres réseaux de transport – et de façon d'autant plus rapide et efficiente qu'il utilise les capacités de transport en DC. ■

L'auteur

Hubert de la Grandière (Ecole Polytechnique 1993, ENSTA 1998) a démarré sa carrière dans le ferroviaire. Après diverses fonctions de gestion de projet dans la ligne de produit tramway d'Alstom, il la dirige de 2003 à 2005. Fin 2005, il rejoint l'activité signalisation d'Alstom. Il prend la tête de son usine et centre d'excellence en électronique de contrôle de Villeurbanne, avant de devenir Vice-président des produits de signalisation en 2007, puis Vice-président de l'activité signalisation grandes lignes en 2011. Courant 2013, il intègre l'activité énergie d'Alstom Grid et dirige le site de disjoncteurs de Villeurbanne. En mai 2016, il quitte ses fonctions chez Alstom, devenu General Electric, pour prendre la direction générale de SuperGrid Institute : centre de recherche et d'innovation expert en matière de systèmes et de technologies pour le courant continu à haute et moyenne tension (HVDC & MVDC).

Les mutations et les métiers futurs du monde de l'électricité pour une réindustrialisation dans le développement durable

Les actions du Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche

Sébastien Chevalier

Chef de service Coordination des stratégies de l'enseignement supérieur et de la recherche

Lors du lancement du programme fêtant les 200 ans d'Ampère le 23 novembre 2020, la ministre de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation soulignait : « *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* ».

Au terme des événements ayant ponctué les 200 ans d'Ampère pendant deux ans, il est important de préciser les actions menées par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche sur ce sujet.

Ces dernières semaines ont été l'occasion pour les Français de se rappeler l'importance de l'électricité dans leur vie quotidienne. Alors que nous parlons de sobriété énergétique, de délestage, de risque de « *blackout* », l'électricité, et plus généralement l'énergie, sont au cœur des préoccupations de l'État. Les 200 ans d'Ampère sont l'occasion de rappeler en quoi « l'électricité » est un enjeu pour l'enseignement supérieur et la recherche à travers son rôle dans un mix énergétique assumé mais également en termes de compétences et métiers en devenir, nécessitant de faire évoluer l'offre de formation de l'enseignement supérieur.

La production d'électricité est un enjeu de souveraineté énergétique pour la nation que ce soit via la production ou par l'intermédiaire d'énergies fossiles et d'énergies renouvelables, avec le développement de production photovoltaïque ou éolienne.

La nécessité de penser à un mix énergétique oblige à développer de nouvelles technologies comme les piles à combustible ou les électrolyseurs permettant de produire de l'hydrogène, considéré comme un nouveau vecteur énergétique.

Portée par les politiques publiques, la recherche française œuvre à trouver les solutions technologiques avec des applications visées à très court terme et ainsi répondre à des besoins croissants et à même de remplacer la contribution des énergies fossiles.

Le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche sous l'impulsion de sa ministre, Sylvie Retailleau, utilise plusieurs leviers pour porter cette ambition avec les établissements et organismes de recherche : les dialogues contractuels, les contrats d'objectifs de moyens ●●●

et de performance, les dialogues de performances et les actions de France 2030.

Cette dernière initiative a porté l'ambition de la France en matière de formation, de recherche et développement, d'innovation et d'impact vis-à-vis des entreprises. Doté de 54 milliards d'euros, France 2030 fait suite aux programmes investissements d'avenir (4 PIA se sont succédés entre 2020 et 2021) et a été annoncé par le Président de la République le 12 octobre 2021 : « *L'objectif de la France de 2030 doit être cela : mieux produire, mieux vivre, mieux comprendre le monde* ».

Ainsi, dix objectifs ou stratégies nationales et cinq leviers sont déclinés pour une stratégie d'innovations de rupture :

Mieux produire

• faire émerger en France des réacteurs nucléaires de petite taille (SMR) d'ici à 2035 ;

• devenir le leader de l'hydrogène vert en 2030 ;

• décarboner notre industrie ;

• produire près de 2 millions de véhicules électriques et hybrides ;

• produire en France, d'ici à 2030, le premier avion bas-carbone.

Mieux vivre

• investir dans une alimentation saine, durable et traçable ;

• produire au minimum vingt bio-médicaments contre les cancers, les maladies chroniques, dont celles liées à l'âge, et créer les dispositifs médicaux de demain ;

• placer la France en tête de la production des contenus culturels et créatifs.

Mieux comprendre

• prendre « toute notre part » à la nouvelle aventure spatiale ;

• investir dans le champ des fonds marins.

En lien avec l'électricité, l'ambition de la France vise à faire émerger en France les réalisations suivantes d'ici à 2030 :

• des réacteurs nucléaires de petite taille innovants, avec une meilleure gestion des déchets ;

• devenir le leader de l'hydrogène vert en 2030 en construisant en France au moins deux « giga-factories » d'électrolyseurs afin de massivement produire de l'hydrogène et l'ensemble des technologies utiles à son utilisation ;

• investir dans les technologies de rupture et dans les énergies renouvelables, en particulier les éoliennes, terrestres, en mer et le photovoltaïque ;

• produire près de 2 millions de véhicules électriques et hybrides.

Des « Programmes et équipements prioritaires de recherche » sont déployés afin de porter l'ambition de la recherche dans chacun de ces objectifs. Les besoins en compétences et les métiers d'avenir sont envisagés grâce à un appel à manifestation d'intérêt (compétences, et métiers d'avenir) doté de 2,5 milliards d'euros et qui permet :

• d'établir les diagnostics en emplois-compétences pour contribuer au déploiement d'une ou plusieurs stratégies et qualifier les besoins de formation ;

• de mettre en place les dispositifs de formation pour répondre aux besoins en compétences et ainsi développer les dispositifs de formation pour accompagner une ou plusieurs stratégies nationales.

Au cours des deux premières vagues de cet appel à manifestation d'intérêts, près de 500 millions d'euros ont été octroyés pour permettre l'adéquation de formations ou la création de nouvelles formations permettant le développement de nouvelles compétences pour les étudiants et les salariés via la formation tout au long de la vie.

L'auteur

Sébastien Chevalier est Professeur des universités, physico-chimiste et spécialiste de sciences des matériaux. Depuis 2020, il est Chef du service de la coordination des stratégies de l'enseignement supérieur et de la recherche au sein du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, service commun à la DGESIP et la DGRI. Il a été codirecteur du laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, Vice-président de l'université de Bourgogne en charge de la formation, de la réussite et de l'insertion professionnelle des étudiants. Coordinateur de plusieurs actions des Programmes Investissements d'Avenir, il a été chargé de mission du PRES Bourgogne Franche-Comté. Sébastien Chevalier a été Professeur invité à plusieurs reprises au Japon, en Pologne et en Suède. Il est auteur de plus de 120 publications et a écrit ou contribué à 16 ouvrages scientifiques.

Globalement, sur les 136 projets retenus, un peu plus de la moitié d'entre eux (69) sont portés par une université ou un établissement d'enseignement supérieur et de recherche (école d'ingénieur, organisme de recherche…), et ils représentent environ les 2/3 des financements alloués.

L'électricité est directement ou indirectement impliquée dans les objectifs France 2030 : nucléaire, hydrogène, production d'énergie décarbonée (photovoltaïque et éolien), décarbonation et transport. La dynamique insufflée par l'enseignement supérieur et la recherche à travers France 2030 mais également par l'intermédiaire de toutes les actions de recherche, d'innovation et de formation contribue indéniablement à poursuivre l'œuvre d'Ampère dans le cadre de la célébration de ses 200 ans ! ■

En tant que membre de la SEE, ✔ vous bénéficiez de nombreux avantages

see since 1883

1 Élargir son réseau professionnel par la participation à des structures de réflexion adaptées

- **6 Clubs techniques**
  - Cybersécurité et Réseaux Intelligents (CRI)
  - Capteurs et Systèmes ElectroMagnétiques (CSEM)
  - Eco-conception en Génie Electrique (EGE)
  - Ingénierie des Systèmes d'Information et de Communication (ISIC)
  - Systèmes Electriques (SE)
  - Stockage et Moyens de Production (SMP)
- **6 Groupes régionaux**

2 Participer et bénéficier de tarifs préférentiels pour les Conférences et Journées d'études SEE

- Conférences nationales et internationales
- Journées d'études thématiques
- Conférences-débats
- Congrès internationaux, en partenariat ou non avec d'autres sociétés scientifiques

3 Consulter et télécharger gratuitement les publications (REE et 3EI) en version numérique et s'abonner aux publications papier à tarif préférentiel

- **La Revue de l'électricité et de l'électronique (REE)** est destinée aux ingénieurs, chercheurs, enseignants, décideurs techniques et économiques intéressés par les secteurs de l'électricité, de l'électronique, de l'information et de la communication. Paraissant cinq fois par an, la revue s'articule autour de dossiers techniques, flash-infos, articles invités, entretiens avec des personnalités du monde de la recherche et de l'industrie.
- **La revue 3EI** est une publication trimestrielle destinée aux professeurs, universitaires et industriels concernés par l'enseignement de l'électricité et de l'électronique industrielle.

4 S'engager dans une association qui reconnaît les talents et crée une émulation parmi ses membres

- Grades senior et émérite SEE
- Remise de prix et trophées pour les professionnels confirmés, jeunes actifs et étudiants (Brillouin-Glavieux, général Ferrié, André Blanc Lapierre…)
- Remise de médailles (Ampère, Blondel…)

Pour rejoindre la SEE, deux modes d'adhésion :

Adhésion individuelle :
via le site www.see.asso.fr
ou le bulletin d'adhésion

Adhésion collective :
partenariat d'entreprise ou d'école via des conventions

NOUS CONTACTER :
SEE - 17 rue de l'amiral Hamelin - 75116 Paris - France
+33 (0)1 56 90 37 17 - adhesion@see.asso.fr

www.see.asso.fr