

INTRODUCTION

AMPÈRE : L'ÉLECTRICITÉ COMME PUISSANCE ÉNERGÉTIQUE VINCENT MAZAURIC P.6

PREMIERE PARTIE :

DES PRINCIPES DYNAMIQUES AUX EQUATIONS DE MAXWELL P. 26

DEUXIEME PARTIE:

DES CONTRAINTES DE L'EXPLOITATION AUX EXTERNALITÉS P.31



Liminaire

La commémoration « Ampere 200ans » a suscité plusieurs événements et communications auxquels nous avons associé des publications, des enregistrements ou la diffusion des présentations.

Les conférences ou les brochures sont disponibles et consultables sur le site <u>Ampère200ans.fr</u>.

La revue REE a relayé en particulier les journées thématiques sous la forme de «cahier Azur», recueil d'articles sur les sujets présentés.

Nous avons pensé à vous adresser ce tiré à part du cahier Azur relatant l'événement en souvenir de cette journée, à laquelle vous avez participé ou contribué, mais surtout pour permettre à un plus large public, au-delà des lecteurs habituels de la REE, de profiter de la richesse et de la qualité des informations présentées dans cette revue dont nous remercions les auteurs.

Très bonne lecture,

François Gerin

TIRÉ À PART DE LA REVUE REE 2022-5

SOMMAIRE

3 CAHIER AZUR:

Séminaire « Vers une société bas carbone : l'électricité au cœur de l'énergie et de la digitalisation » - Grenoble, 3 février 2022

3 Présentation de la Conférence :

Gimelec: Christel Heydemann

SEE : François Gerin

6 Introduction:

Vincent Mazauric

11 Vers la seconde révolution de l'électrification : enjeux pour le système électrique

Marie-Cécile Alvarez-Hérault, Nouredine Hadjsaid

- 18 Vers une électronique soutenable dans un monde digital : enjeux et perspectives
 Thomas Ernst
- 25 Proposition thermodynamique vers un monde plus électrique
- 26 Partie I : Des principes dynamiques aux équations de Maxwell

Vincent Mazauric

Partie II : Des contraintes de l'exploitation aux externalités

Vincent Mazauric, Sergio Ciliberto

- Vers des technologies quantiques responsables
 Alexia Auffèves, Olivier Ezratty,
 Robert Whitney
- 43 Ressources minérales et systèmes énergétiques **Olivier Vidal, Hugo Le Boulzec**

Séminaire « Vers une société bas carbone : l'électricité au cœur de l'énergie et de la digitalisation »

Grenoble - 3/02/2022

Présentation de la Conférence

Nous sommes confrontés aujourd'hui à une étape clef de l'évolution de l'énergie qui va conditionner le futur et permettre de réussir la transition énergétique pour sauvegarder notre planète et atteindre la neutralité carbone en 2050...

Les études ou les scénarii pour sortir des énergies fossiles impliquent des transformations profondes voire des bouleversements dans tous les domaines et plus particulièrement dans le transport, l'industrie ou le bâtiment pour plus de sobriété dans un monde de plus en plus connecté et numérisé.

C'est dans ce contexte et en association avec la commémoration du bicentenaire des lois de l'électrodynamique d'André-Marie Ampère que le GIMELEC et le Comité national Ampère 200 ans, avec l'appui de la SEE, ont organisé à Grenoble le 3 février 2022 le séminaire : « Vers une Société bas-carbone : l'électricité au cœur de l'énergie et de la digitalisation ».

Au travers des présentations, l'objectif était de pouvoir apprécier, dans la perspective d'une électrification grandissante par la migration des usages, comment la maîtrise des consommations, y compris dans le monde digital mais aussi par ses actions sur le système énergétique lui-même, permettra de trouver les solutions pour gérer les besoins mais aussi préserver les ressources en matières premières.

Ce séminaire a été introduit par Christel Heydemann, présidente du Gimelec puis François Gerin, président du Comité national Ampère 200 ans et président de la SEE, a rappelé la démarche et les actions menées dans le cadre de l'opération «Ampère 200 ans».

Allocutions

Ouverture du séminaire par Christel Heydemann, présidente du Gimelec

« C'est un grand honneur pour moi d'être ici et d'ouvrir cette conférence scientifique, ce n'est pas si souvent que je le fais en tant que présidente du Gimelec et dirigeante du groupe Schneider Electric. Merci M. le maire, merci Éric Piolle, de nous accueillir à Grenoble, capitale de l'Europe verte en 2022. A Grenoble, chez Schneider Electric, on est dans le berceau, au cœur de notre centre mondial de R&D, c'est ici que l'on conçoit énormément d'innovations qu'on envoie ensuite partout dans le monde. Grenoble c'est aussi historiquement Merlin-Gerin pour nous. On parle des 200 ans des lois d'Ampère mais nous avons aussi fêté notre centenaire Merlin-Gerin.



La raison pour laquelle nous sommes là aujourd'hui c'est qu'évidemment on est tous conscients que les enjeux et le réchauffement climatique vont induire des changements profonds. Cela fait très longtemps que c'est dans ce cadre que Schneider Electric a bâti sa stratégie ainsi que l'ensemble des entreprises du Gimelec.

> La France et l'Europe, c'est beaucoup d'entreprises qui sont des leaders mondiaux pour ces enjeux et dans les technologies qui vont être absolument clés pour la révolution qui est devant nous.

> Pourquoi la révolution ? : c'est parce qu'aujourd'hui on parle trop souvent du nucléaire quand on évoque le débat sur la transition écologique, en France en particulier ou en Europe. Si on veut décarboner la planète et les usages, l'électricité est le moyen, combiné au digital, de consommer plus efficacement. On parle trop souvent du mix énergétique, le premier levier dans la bataille contre le changement climatique, c'est un levier d'efficacité. Aujourd'hui, l'électricité c'est 20 % de l'énergie mondiale, en 2030 on estime que ce sera 30 % et qu'en 2050, ce chiffre aura doublé voire plus selon les scénarii. Il faut bien se rendre compte que par rapport à tout ce qui a été construit depuis les lois d'Ampère et finalement depuis la conception de l'électricité, on va devoir investir dans les 30 prochaines années autant que ce qui a été fait depuis toute l'histoire de l'électricité.

> Ce sont des enjeux scientifiques majeurs, des enjeux technologiques, des enjeux humains, des enjeux de compétence et des enjeux de fonctionnement différent. Il nous faut évidemment embarquer la société au sens large, donc les entreprises qui sont très engagées, les entreprises de la filière du Gimelec que je représente, qui conçoivent des technologies qui sont à la croisée de l'électron et de l'octet; c'est passionnant puisque, que ce soit dans l'électricité dont j'ai beaucoup parlé ou dans le digital évidemment, on est sur des domaines en changement permanent et

il est très important pour les entreprises de la filière que je représente d'échanger avec les scientifiques que vous êtes puisque, à l'évidence, on est sur des sujets qui évoluent très vite et pour lesquels l'enjeu c'est bien d'amener au plus vite des innovations dans les marchés.

Je remercie en particulier Vincent Mazauric qui a beaucoup contribué à l'organisation de cette journée chez Schneider Electric. »

NB: Présentation audible en intégralité, informations ou documents disponibles sur le site ampere200ans.fr.

Seul le prononcé fait foi.

Résumé de l'exposé de François Gerin, président de la SEE et président du Comité national Ampère 200 ans

En introduction, François Gerin a tout d'abord rappelé que l'anniversaire de la découverte des lois de l'électrodynamique a reçu le soutien de madame Frédérique Vidal, ministre de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation qui lui a accordé son haut patronage, et bénéficié du parrainage de Gérard Mourou, Prix Nobel de physique 2018, connu pour avoir développé le système d'amplification de laser de très haute puissance mais aussi pour les applications développées en ophtalmologie pour la myopie et l'hypermétropie; plusieurs dizaines de millions de personnes ont déjà profité de ces avancées technologiques.

Avec de tels auspices, le programme a pu démarrer il y a exactement deux ans et parmi les manifestations organisées, vous pourrez trouver dans la brochure* les informations relatives à la journée organisée le 23 novembre 2020. Cette journée a permis de décrire à la fois des applications industrielles qui se situent dans le prolongement des découvertes d'Ampère mais aussi l'aspect historique avec la richesse de l'homme André-Marie Ampère. Celui-ci a en effet connu une vie très intéressante mais aussi très triste en raison de la perte de son père guillotiné en 1793 à Lyon puis une vie sentimentale très compliquée et



 malheureuse, atténuée toutefois par les satisfactions que son fils lui a apportées puisque celui-ci est devenu membre de l'académie française.

> A titre personnel, Ampère - tout étant autodidacte - a développé des compétences remarquables grâce aux livres que son père lui rapportait de Lyon pour qu'il les étudie à Poleymieux. Notre brochure présente également la propriété dans laquelle Ampère a vécu une jeunesse heureuse jusqu'à l'âge de 18 ans, bouleversé par cette horrible nouvelle de la mort de son père dont il a mis plus d'un an à se remettre. Il a développé des activités dans les domaines des mathématiques, il a été répétiteur puis professeur d'analyse à l'Ecole polytechnique, il a été élu au Collège de France dans le domaine de la physique, il a œuvré aussi dans la chimie et même abordé le domaine de l'optique, ce qui a beaucoup intéressé Gérard Mourou, car il avait comme locataire à Paris Augustin Fresnel avec qui il a développé ses théories ondulatoires sur la lumière.

> François Gerin précise qu'il a semblé important que toute la richesse de ce savant « polymathe », comme dit Gérard Mourou, puisse être mieux connue et reconnue. Il faut savoir qu'il y a un siècle le président des États-Unis avait souhaité que les cendres d'Ampère puissent être transférées au Panthéon, mais cela n'a pas été possible; Ampère est enterré au cimetière de Montmartre avec son fils Jean-Jacques. Ampère a été un homme très complet, il a même écrit des poèmes et certains seront lus à la fête du festival Ampère au mois de juin prochain dans le cadre des célébrations à Poleymieux-au-Mont d'Or. Bien entendu, dans l'électrification, évoquée dans les sujets de cet après-midi, il a joué un rôle considérable parce qu'il a pu bénéficier de l'invention de la pile électrique par Volta qui aura permis ses expériences et la démonstration de ses théories, il y a 200 ans.

> Le point également important pour l'électricité, ce sont les métiers qui, comme vous le savez et comme on dit mainte

nant, sont en forte tension, les employeurs n'arrivant pas à trouver suffisamment de jeunes pour les rejoindre : il y aura des métiers évolutifs et près de 200 000 emplois vont être créés d'ici 2030 ; ce sont vraiment des métiers d'avenir et c'est le sens des messages que nous passons à l'intention des jeunes dans les lycées et dans le supérieur. Nous avons ainsi été amenés à faire quelques expositions comme au Musée d'histoire des sciences à Genève, à l'école polytechnique au Mus'X juste avant le confinement, l'an dernier à CentraleSupélec et bientôt l'exposition prévue à la bibliothèque de la Cité des sciences à la Villette à Paris.

Pour les jeunes, on a lancé un concours national avec palmarès et dédicace de Gérard Mourou pour les lauréats. On a organisé des journées sur les métiers de l'électricité pour sensibiliser les jeunes des classes de seconde jusqu'au niveau BTS : la première était faite avec Enedis dans un espace du quartier de Grenelle à Paris avec une soixantaine d'élèves et une nouvelle opération a eu lieu au mois de janvier à Nancy ; la poursuite s'est avérée très compliquée à cause de la pandémie qui a affecté aussi notre commémoration. Par ailleurs, nous avons réalisé une brochure* sous forme d'une bande dessinée qui présente la vie et l'œuvre d'Ampère pour les jeunes du primaire, que nous avons diffusée par le canal des académies. Enfin, on essaye de remettre en état les tables des expériences qui permettent de démontrer les découvertes d'Ampère, dont celle qu'il a conçue et construite pour le Collège de

Parmi les évènements, y a eu le 14 février 2020 une séance délocalisée de l'Académie des sciences à Lyon, la journée Ampère en mode virtuel le 23 novembre 2020 et au mois d'octobre dernier une journée sur la mobilité électrique à CentraleSupélec, reprise dans la revue REE (numéro 2022-2). On prévoit également la pose d'une « Milestone » IEEE au Collège de France où Ampère a été professeur de physique.

Le 6 octobre 2021, avec la présence active du professeur Serge Haroche, prix Nobel de physique 2012, nous avons posé une plaque de site historique de la physique européenne de l'European Physical Society et Serge Haroche avait donné le matin même une conférence à l'université de Lyon sur la lumière.

François Gerin a évoqué ensuite ce qui s'est passé après la présentation de l'expérience d'Oersted (déviation d'une aiguille magnétisée à proximité d'un fil conducteur connecté aux bornes d'une pile électrique) le 11 septembre 1820 à l'académie des sciences, quand une semaine plus tard, le 18 septembre, Ampère a réussi à expliquer cette expérience et à généraliser ce phénomène à deux conducteurs parcourus par du courant électrique, qu'il a appelé l'électrodynamique, loi qui porte son nom. Tout ceci est présenté dans le musée Ampère et François Gerin a invité à le visiter en citant, notamment pour les jeunes, les ateliers découvertes qui y sont présentés. Il a aussi mentionné les vitrines avec les expériences et les expositions dont une copie de la table d'expériences du Collège de France dont les expériences devraient faire l'objet d'une modélisation numérique facilement distribuable dans les établissements scolaires.

Le président Gerin a rappelé enfin que la SEE est propriétaire de ce domaine du musée Ampère depuis 1928, géré par la Société des amis d'André Marie Ampère, pour perpétuer la mémoire d'Ampère. Ce musée très complet présente de nombreux appareils électriques mais aussi électroniques que François Gerin invite à découvrir à l'occasion du Festival Ampère organisé les 5 et 6 juin prochains.

Enfin, celui-ci a présenté le film d'animation* qui décrit les découvertes d'Ampère, réalisé grâce au financement des Alumni de Grenoble INP qu'il a remerciés.

NB: Présentation audible en intégralité, informations ou documents* disponibles sur le site ampere200ans.fr.

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.



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.

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.

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 Refe

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 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...









Introduction

Ampère : l'électricité comme puissance énergétique

Vincent Mazauric

Schneider Electric

De Lyon à Grenoble : «le courant ampérien» de l'électrification

Lorsque qu'en 1882 à Lancey (Isère) Aristide Bergès, pourtant pyrénéen, invente la « Houille Blanche » en couplant une dynamo Gramme à la force hydraulique résultante d'une chute de cinq cent mètres en conduite forcée, il inaugure une ère nouvelle où l'électricité sort du laboratoire et devient industrielle. Il pressent également l'intérêt de cette nouvelle forme d'énergie :

- plus souple à piloter par l'action simultanée de la puissance mécanique injectée et de l'excitation de la machine ;
- moins capitalistique à transporter une première démonstration en courant continu sera réalisée de Vizille à Grenoble en 1883 que les énergies primaires à l'époque disponibles, essentiellement le charbon, conférant ainsi les gains de productivité suffisant à un « effet rebond » propice à un développement de l'électricité jusqu'à aujourd'hui ;
- bénéficiant de nouveaux usages qui lui deviendront spécifiques comme la télégraphie ou l'éclairage, la lampe à incandescence ayant été découverte trois ans plus tôt par Thomas Edison aux Etats-Unis.

Les expositions universelles de l'époque témoignent ainsi de la « fée électricité » et insistent déjà sur l'idée d'une énergie localement « propre » ¹ évitant les usines à gaz à proximité des villes ce qui deviendra largement abusif au regard de la génération d'origine thermique qui se généralisera au XXème siècle.

Non loin de Lancey, les forges d'Allevard commençaient également à produire des aimants, première manifestation de la nécessité de « stocker » l'électricité, en l'espèce sous la forme d'énergie magnétique, mais aussi de la matérialité nécessaire à ce stockage. Commençait ainsi à apparaitre l'idée de matériaux spécifiques fonctionnels : le fer bien sûr, en compétition d'usage avec les applications mécaniques, mais plus tard le cobalt, le nickel et désormais les terres rares.

Dans cette aventure industrielle, l'innovation s'appuie sur des expérimentations ancrées dans des territoires riches de pratiques et d'organisations favorables à un foisonnement entre universalisme, découvertes scientifiques et savoir-faire techniques véhiculés puis perpétués par des écoles techniques pionnières ², également embryons de futures écoles d'ingénieurs ³. En ce sens cette réussite grenobloise s'inscrit dans une région en plein développement industriel où André-Marie Ampère avait ouvert la voie de l'électrodynamique

soixante ans plus tôt à Lyon, au-delà bénéficiant du dynamisme économique de Genève et par-delà les Alpes de l'Italie du Nord où Galileo Ferraris développait à Turin le concept de champ tournant qui, exploité par Nikola Tesla, structurera toute la génération et le transport de l'électricité jusqu'à aujourd'hui.

Cette complémentarité entre enseignement, recherche et industrie sera à l'origine de la réussite de l'écosystème grenoblois au cours du XX^{ième} siècle autour du développement de l'électricité et de ses usages spécifiques dans les domaines :

- de l'énergie grâce à la croissance soutenue de l'hydroélectricité, d'abord nationale avec les établissements Bouchayer-Viallet puis fortement exportatrice sous Neyrpic devenu Alstom Hydro puis GE Renewable Energy. Dans le même temps, la création de Merlin Gerin en 1920 à Grenoble - devenu Schneider Electric en 1992 - anticipe une création de valeur qui se déplace vers le transport, la distribution et des usages sectoriels et sécurisés de l'électricité. La création en 1920 d'un Institut économique et juridique de l'énergie alors que se précisent les grands ouvrages d'électrification tournés vers l'alimentation des grands centres urbains et industriels, le plus souvent au détriment des populations locales, préfigure également que les enjeux de la domestication de l'énergie ne sont pas purement techniques.
- des technologies de l'information et de la communication (TIC) avec la création en 1967 du Laboratoire d'Etude des Technologies de l'Informatique (LETI) par le

¹ On parlerait aujourd'hui d'émissions directes.

² Par exemple l'école des métiers de l'énergie fondée en 1929 par Merlin-Gerin (https://www.se.com/ fr/fr/about-us/ecole-schneider-electric/).

³ Paul Janet inaugure un premier cours « d'électricité industrielle » à la Faculté des sciences de Grenoble en 1892 avant de devenir Directeur de L'Ecole Supérieure d'Electricité fondée en 1894.

- Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) qui accompagnera le développement de deux entreprises de classe mondiale : ST Microlectronics et SOITEC. Parallèlement, la création de l'Ecole Nationale Supérieure d'Informatique et de Mathématiques Appliquées (EN-SIMAG) en 1960 puis l'installation de l'Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (INRIA) en 1992 à Montbonnot affirment la nécessité de maîtriser également les aspects logiciels des technologies de l'information et de la communication, qu'il s'agisse de concevoir 4, prévoir, contrôler ou optimiser.
- des *matériaux* : notamment pour le stockage de l'énergie électromagnétique : demain Verkor dans le stockage électro-chimique, hier Ugimag dans l'invention puis la fabrication d'aimants à forte coercitivité ; ou encore des procédés uniques d'élaboration, par exemple sous lévitation magnétique ; enfin Air liquide et son laboratoire de technologies avancées autour du développement de piles à combustible et d'étude sur le vecteur hydrogène, sans oublier McPhy en constant développement sur ce segment.

Cette image ne serait évidemment pas complète sans évoquer la contribution décisive pour Grenoble de Louis Néel, Prix Nobel de physique 1970:

- qui, prévoyant et anticipant la variété des matériaux magnétiques au-delà des métaux ferromagnétiques classiques, percevant les apports de la mécanique quantique et de la thermodynamique statistique pour justifier puis élaborer des alliages métalliques magnétiques essentiels à la conversion réversible entre énergie électrique et énergie mécanique, unifie l'électrodynamique d'Ampère et l'électromagnétisme de Maxwell avec la physique du solide et la chimie des matériaux;
- dont l'esprit « bâtisseur », convaincu de la puissance des applications pour dynamiser

la recherche fondamentale, structure jusqu'à aujourd'hui la présence unique en province d'organismes : première implantation du CNRS hors lle de France, place unique du CEA à Grenoble ⁵ ; de laboratoires ⁶ et de grands instruments européens, ILL et ESRF 7; aux côtés d'une université puissante adossée à un réseau d'écoles d'ingénieurs couvrant tous les champs disciplinaires de l'énergie en général et du génie électrique en particulier, des sciences de l'information et de la communication, et de la physico-chimie des matériaux

Deux cents ans après les lois de l'électrodynamique d'André-Marie Ampère, cent quarante ans après l'invention de la « houille blanche » par Aristide Bergès et un siècle après la fondation des établissements Merlin-Gerin:

- · le système électrique constitue une infrastructure critique pour l'ensemble des commodités qui fondent les sociétés actuelles en raison de ses usages spécifiques, notamment les TIC;
- les usages électriques représentent environ 20 % de l'énergie finale mais la génération électrique est à l'origine de 45 % des émissions anthropiques de dioxyde de carbone et draine un peu moins de 30 % de l'énergie primaire;
- · l'accès à l'électricité constitue un indicateur du développement alors que près de 1,4 milliard de personnes dans le monde en sont privées. L'illectronisme se développe également en marge de sociétés de plus en plus

Cette image contrastée résulte d'une logique de performance technologique tirée par les

5 Création du centre d'étude nucléaire en 1956 après l'installation du CNRS en 1946.

gains de productivité escomptés par le développement des usages électriques, notamment spécifiques. En partie induite par un effet rebond toujours renouvelé, l'organisation actuelle du système électrique est de plus en plus questionnée en raison de sa matérialité, qu'il s'agisse des émissions de gaz à effet de serre par le recours à des sources pilotables carbonées, ou de l'usage croissant de matériaux structurels ou fonctionnels stratégiques. Le défi lancé à ce secteur - et à l'écosystème grenoblois en particulier - est de définir un paradigme de transformation inclusive du système énergétique fondé sur la soutenabilité.

Enjeux d'aujourd'hui et de demain

L'évolution des politiques énergétiques est aujourd'hui au cœur du débat public que ce soit en France, en Europe ou dans le monde : en témoignent l'importance des négociations climatiques dans le cadre de la conférence des parties pour les changements climatiques (CNUCC) 8 dans un contexte où le secteur de l'énergie est identifié comme responsable de plus de 2/3 des émissions anthropiques mondiales de gaz à effet de serre., l'effervescence autour du 6ème rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) 9 ou les récentes « fragilités » des feuilles de route énergétique européennes (indexation des prix de l'électricité sur le gaz, difficultés financières des opérateurs historiques, retour du charbon en Allemagne, risques de black-out en France...) alors qu'elles devaient favoriser l'amorce d'une transition « bas carbone ».

Dans toutes les enceintes compétentes, le système électrique est identifié comme le vecteur majeur de la transition énergétique, que ce soit pour des raisons intrinsèques de valorisation des productibles décarbonés ou pour sa capacité à offrir des substitutions d'usage dans le cadre d'une migration vers l'électricité. Le système électrique devrait ainsi évoluer pour accompagner ces trans-

4 A l'interface du génie électrique et de la concep-

⁶ Le Laboratoire d'électrostatique et de physique du métal deviendra l'Institut Néel en 2007.

⁷ Institut Laue Langevin en 1967, laboratoire européen de rayonnement synchrotron (ESRF) en 1985, et pour couvrir la « palette » des champs magnétiques, le Service National des Champs Magnétiques Intenses en 1968 et le Laboratoire de Magnétisme du Navire qui « fixe » Louis Néel à Grenoble dès

⁸ https://unfccc.int/fr 9 https://www.ipcc.ch/

tion, le logiciel de CAO électrotechnique de classe mondiale Flux développé initialement au G2ELab par le CNRS et l'INPG est actuellement édité par la socié-

té Altair : https://www.altair.com/flux-applications/

L'évolution des politiques énergétiques est aujourd'hui au coeur du débat public que ce soit en France, en Europe ou dans le monde : en témoignent l'importance des négociations climatiques, (...) l'effervescence autour du dernier rapport du GIEC, ou les récentes « fragilités » des feuilles de route énergétique européennes (...) alors qu'elles devaient favoriser l'amorce d'une transition « bas carbone »

formations, qu'il s'agisse des modes de consommation, de la versatilité des usages et des charges, ou de la diversification et de la localisation des moyens de production tout en maintenant la qualité de service et en garantissant des coûts abordables pour ses usagers constitués de particuliers, de collectivités, d'industries, de services, de commerces ou de l'agriculture : plus encore qu'hier, l'électromagnétisme serait au centre des technologies de la conversion d'énergie et de l'information.

Les contributeurs de ce dossier partagent l'idée que l'évolution vers un système énergétique soutenable implique une large part d'électricité – typiquement autour de 50 % en 2050 – et doit s'envisager dans un cadre prenant en compte les besoins de services énergétiques, tout en limitant la dégradation induite de notre environnement malgré la matière nécessaire pour bâtir l'infrastructure énergétique. Cette exigence définit les trois dimensions qui fondent la thermodynamique comme cadre naturel de réflexion et d'arbitrage technologique dédié à la soutenabilité : la matérialité de l'infrastructure et son organisation, l'énergie qu'elle soutire et la part qu'elle dégrade sous forme entropique pour délivrer des services énergétiques.

L'évolution vers la soutenabilité sera envisagée sous deux regards croisés :

• la scénarisation de la transformation à opérer du système électrique et de ses usages, en l'espèce ses fonctions de génération, de conversion de puissance et de traitement de l'information, en particulier la bifurcation depuis l'état de l'art au regard de ce que nous sommes et de ce que nous pensons devoir devenir;

 l'analyse et l'évaluation de ces transformations dans le cadre exhaustif que constitue la thermodynamique.

Ainsi:

- Dans une première contribution, Marie-Cécile Avarez-Hérault et Nouredine Hadj Saïd se pencheront sur les transformations nécessaires des infrastructures de génération du système énergétique et les adaptations à opérer du réseau de transport et de distribution. Ils reviendront également sur l'évolution des modes de gestion du système pour accommoder les énergies renouvelables à la gestion de l'équilibre du réseau et décriront de nouveaux leviers de flexibilité comme la participation des usagers pour gagner en efficacité et en souplesse.
- Les technologies de l'information et de la communication constituent à la fois un usage structurant de sociétés de plus en plus digitales mais sont également envisagées pour favoriser la transition énergétique. Après avoir rappelé les formidables progrès réussis par cette industrie depuis l'énoncé des lois de Moore et Koomey, Thomas Ernst décrira les orientations envisagées pour initier le développement d'une électronique plus soutenable.

- Une troisième contribution en deux parties, associant Vincent Mazauric et Sergio Ciliberto, décrira d'abord le cadre thermodynamique dans lequel s'évalue la soutenabilité du système électrique et de sa transformation. Si le vecteur électrique évolue selon une propriété favorable de réversibilité, ses conditions d'opération nécessitent de trouver un arbitrage soutenable entre l'inertie du système et l'agilité de son système de contrôle, ainsi que la matérialité de l'infrastructure. Les auteurs reviendront ensuite sur le lien entre énergie et information effectué par les calculateurs «classiques» actuels et leurs limites thermodynamiques exprimées par le principe de Landauer.
- Devant le « mur » de l'énergie que constitue le « data deluge » et l'essoufflement observé de la loi de Koomey, Alexia Auffèves, Olivier Ezratty et Robert Whitney s'interrogeront sur l'avantage de nature énergétique que pourraient apporter les technologies quantiques et revisitent la notion de suprématie quantique devant l'exigence de soutenabilité des technologies de l'information.
- Enfin **Olivier Vidal** et **Hugo Le Boulzec** questionneront la matérialité structurelle, fonctionnelle et énergétique des infrastructures énergétiques décarbonées elles-mêmes et de leurs usages. Ils montreront qu'une approche dynamique et régionalisée qui va bien au-delà des strictes questions technologiques est nécessaire pour aboutir à une transition énergétique inclusive qui tienne compte des différents scénarios de développement.

Ce dossier, délibérément scientifique et technique, s'inscrit dans le cadre de la commémoration du bicentenaire des lois de l'électrodynamique d'Ampère qui a été organisée à Grenoble le 3 février 2022 ¹⁰. Mais en adoptant un prisme d'analyse des trajectoires de transformation des systèmes électriques permises par la thermodynamique, ce dossier interroge également sur les aspects sociétaux de la transition écologique.

¹⁰ Voir : https://ampere200ans.fr/retour-sur-le-se-minaire-vers-une-societe-bas-carbone/

••• Et maintenant?

Même s'il n'a pas ici été question d'envisager le sentier de transition sous tous ses aspects systémiques [1] précédemment ébauchés et au-delà souvent controversés, la thermodynamique permet aussi de structurer la réflexion sur la cinétique de la transition à opérer, appelée phase de transition dans le contexte des sciences humaines et sociales [2]:

- La flèche du temps est donnée par la création d'entropie, notion intimement liée à l'information manquante pour décrire parfaitement un système complexe [3];
- Quelle que soit l'échelle considérée depuis l'agrégat moléculaire aux structures et sociétés complexes, l'espace exhibe des formes d'organisation collectives plus ou moins régulières dont la stabilité résulte de considérations énergétiques [4].

La conjonction de ces deux aspects accroît la difficulté à réaliser une transition homogène puisque :

- Le caractère plurifactoriel renforce la stabilité initiale du système ;
- L'horizon de temps limité éloigne le sentier de transition de sa réalisation quasi-statique.

En d'autres termes plus la transition s'envisage sur des sociétés complexes dans une durée limitée, plus elle sera facteur de dissipation donc plus elle nécessitera d'énergie (en l'espèce pas encore décarbonée) pour aboutir à sa cible, induisant son propre mécanisme de ralentissement et de renforcement de l'urgence bien identifié en théorie des transitions de phase ¹¹ et interprété dans le contexte du changement climatique par le « coût de l'inaction » [5]. Ainsi, il convient d'adopter un cadre exhaustif d'analyse que ce dossier propose de définir en interrogeant simultanément les aspects matériels, l'énergie et l'information pour se

prémunir des effets d'évitement et décider collectivement le plus en amont possible de mécanismes de transformation se situant dans des organisations plus localisées, donc moins inertielles, favorisant les structures de moindre dissipation [6] et ainsi trouver la fluidité nécessaire à la diffusion des technologies « bas carbone »[7].

Ce dossier dans la Revue de l'Electricité et de l'Electronique s'adresse donc non seulement aux générations qui devront s'adapter au changement climatique mais également aux « forces vives » qu'il faudra mobiliser autour de vocations scientifiques et techniques et d'engagements sociétaux pour mettre en œuvre dans un esprit d'ouverture les solutions d'atténuation. En ce sens, ce dossier s'inscrit dans l'ambition collective et citoyenne portée par Grenoble Capitale Verte de l'Europe 2022 12 pour fédérer les acteurs académiques, économiques et institutionnels à agir ensemble pour le climat et l'enjeu écologique.

Mais nous espérons également que ce dossier témoignera de la formidable fertilité de l'électromagnétisme à Grenoble, qu'il s'agisse du développement de technologies de conversion d'énergie et de l'information « bas carbone », ou du cadre conceptuel procuré par la richesse des modèles magnétiques pour décrire les transitions de phase et les phases de transition dans les systèmes fortement corrélés.

Références

- [1] «Laudato-si,» Libreria Editrice Vaticana, 2015.
- [2] A. Millot, «Faire la transition énergétique bas-carbone ou comment réaliser l'avènement d'un mythe ?» Ph.D. sous la direction de N. Maïzi, École doctorale Sciences et technologies de l'information et de la communication, École nationale supérieure des mines de Paris, Sophia Antipolis, France, 2019.
- [3] L. Brillouin, *Science and information theory.* New York, USA: Academic Press, 1956.
- [4] A. S. Mikhailov and V. Calenbuhr, From cells to societies: Models of complex coherent action. Berlin, Germany: Springer, 2002
- [5] N. Stern, «The Stern Review report: The economics of climate change,» HM Treasury, London, United-Kingdom, 2006.
- [6] I. Prigogine and R. Lefever, «Theory of Dissipative Structures,» in *Synergetics:* Cooperative Phenomena in Multi-Component Systems, H. Haken, Ed., ed Wiesbaden, Germany: Vieweg & Teubner Verlag, 1973, pp. 124-135.
- [7] D. Dasgupta, J.-C. Hourcade, and S. Nafo, «A Climate Finance Initiative to achieve the Paris agreement and strenghten sustainable development,» Ministry of Ecological and Solidarity Transition, Paris, France, April 2019.

12 https://greengrenoble2022.eu/

Les articles

| Vers la seconde révolution de l'électrification : enjeux pour le système électrique | |
|--|------|
| Vers une électronique soutenable dans un monde digital : | |
| enjeux et perspectives | p.18 |
| Proposition thermodynamique vers un monde plus électrique | e |
| Préambule : | p.25 |
| Partie I : Des principes therrmodynamiques aux équations de Maxwell | p.26 |
| Partie II: Des contraintes de l'exploitation aux externalités | p.31 |
| Vers des technologies quantiques responsables | p.38 |
| Ressources minérales et systèmes énergétiques | p 43 |

¹¹ Appelé également "critical slowing down" dans la littérature.

Vers la seconde révolution de l'électrification : enjeux pour le système électrique

Marie-Cécile Alvarez-Hérault

Maîtresse de conférences, Grenoble INP-UGA

Nouredine Hadjsaid

Professeur, Grenoble INP-UGA

La décarbonation de l'énergie, défi sociétal majeur des années à venir, va profondément transformer nos habitudes de consommation énergétique. L'électrification intelligente des usages couplée à l'efficacité et à la sobriété énergétique est un levier majeur pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. Le réseau électrique devra évoluer profondément pour relever les défis techniques et économiques de cette électrification massive dans un contexte incertain tout en garantissant la résilience du système dans son ensemble.

Introduction

NAE (National Academic of Engineering) ¹ a classé l'électrification comme la plus grande réalisation de l'humanité du XXème siècle. Des milliers d'ingénieurs ont permis cet avènement grâce à de multiples innovations sur les sources d'énergie, le transport et la distribution de l'électricité. L'électrification a donc été une première révolution pour l'humanité améliorant l'indice de développement humain, IDH, créé par le programme de développement des Nations Unies. Cet indicateur intègre l'accès à l'éducation, le développement économique et l'accès à la santé. L'électricité représente aujourd'hui entre 20 à 25 % de l'énergie finale dans le monde et il reste encore 770 millions de personnes 2 sans accès à l'électricité.

Le système électrique : le système le plus complexe jamais construit par l'homme

Le système électrique s'est construit petit à petit à partir d'îlots qui produisaient et consommaient localement et qui se sont interconnectés au fur et à mesure pour des raisons économiques et de fiabilité. Le système électrique est donc un facteur d'économie global car il permet une mutualisation d'usages et de productions

qui sont différents par nature. Cet effet de foisonnement permet donc à chaque utilisateur d'accéder à la source la plus disponible, la moins chère et la plus flexible à chaque instant.

Un système complexe

Le système électrique est par nature un système complexe. Il est couplé à d'autres infrastructures comme celles d'information et de communication, d'énergies primaires et d'eau. Ces systèmes sont donc interdépendants et une défaillance sur une de ces infrastructures peut se répercuter sur le système électrique. Ensuite, il est de très grande dimension et souvent transfrontalier. Des incidents peuvent donc se propager dans le réseau et aller jusqu'à la panne généralisée (blackout) sur de grandes étendues géographiques. On peut citer l'exemple de la panne du 4 novembre 2006, quand la mise hors tension d'une ligne haute tension pour le passage d'un bateau au nord de l'Allemagne s'est propagée à large échelle et a provoqué la séparation du réseau européen en 3 zones synchrones évitant de peu un blackout sur •••

Le nouveau défi sociétal actuel est la neutralité carbone à horizon 2050 et les différents scénarios nationaux et internationaux convergent vers le consensus que la décarbonation implique une augmentation importante de l'électricité jusqu'à 50 % de l'énergie finale consommée ³ à horizon 2050. Cette trajectoire est une seconde révolution de l'électrification amenant de nombreux défis que le système électrique doit relever.

¹ Equivalent américain de l'Académie des Technologies

² World Energy Outlook 2021

³ Agence Internationale de l'Energie

l'ensemble du réseau interconnecté. Enfin, il est soumis en permanence à diverses perturbations qui ne doivent pas altérer la continuité de fonctionnement car le réseau électrique est une infrastructure vitale et essentielle pour les économies modernes. On estime que le coût économique d'un blackout pour un pays comme la France sur une journée peut avoisiner 1 % du PIB.

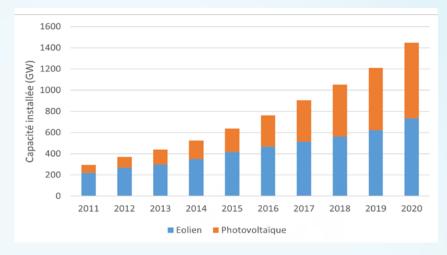
L'électricité, un vecteur énergétique « spécial »

Un vecteur polyvalent, versatile et porteur d'intelligence

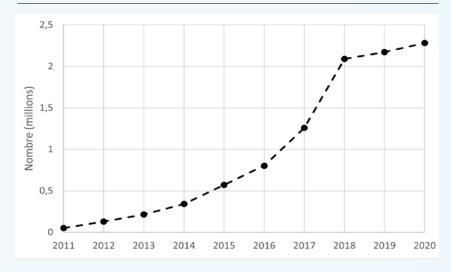
Le vecteur électrique est le vecteur énergétique le plus polyvalent et assez aisément contrôlable. Il est de plus versatile, flexible et porteur d'intelligence. En effet, il est facile de le produire de manière propre grâce au soleil, au vent et à l'eau par exemple. On peut le transporter sur de grandes distances et le distribuer facilement à faibles pertes grâce notamment aux transformateurs. Il peut également être produit, transformé et consommé localement. Il est possible de lui adjoindre des signaux de contrôle comme des ondes porteuses pour piloter des usages ce qui est un élément important pour l'efficacité énergétique, la sobriété et la flexibilité. Il est très flexible puisque son utilisation est de plus en plus étendue : automobile, aviation, espace, bateaux, systèmes de télécommunication et médecine/biotechnologies, etc.

Particularités du vecteur électrique

Le vecteur électrique n'est cependant pas stockable à grande échelle ce qui impose des règles dans le système électrique comme par exemple la règle d'équilibre instantané entre production et consommation. De plus, il doit être distribué et accessible en permanence car les conséquences économiques sont lourdes. Sur le plan sociétal, il est fondamental et indispensable pour le développement économique et humain et est associé à une notion de progrès comme vu en introduction. Enfin, d'un point de vue politique, le débat sur sa nature reste ou-



■ Figure 1 : Evolution de la puissance installée d'éolien et de photovoltaïque entre 2011 et 2020 [1]



■ Figure 2 : Nombre de véhicules électriques vendus. ⁴

vert : est-ce une marchandise classique ou un service ?

Changement de paradigme depuis quelques années

Ces dernières années, de nombreuses lois en lien avec l'écologie ont vu le jour, comme par exemple, la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV, 2015), la conférence des parties (COP) et le pacte vert pour l'Europe (Green Deal, 2019) conduisant au développement massif des énergies renouvelables et de la mobilité propre, notamment électrique. Sur la période 2013-2018, entre 240 et 320 milliards de dollars par an ont été investis dans les énergies renouvelables dans le monde. La figure 1 montre en particulier la dynamique de développement rapide de

l'éolien et du photovoltaïque (PV) depuis 2011 en termes de capacité installée On peut notamment observer une croissance très importante pour le PV avec un facteur de presque 10 entre 2011 et 2020 contre un facteur 3 pour l'éolien sur la même période. Fin 2020, la puissance installée d'éolien et de photovoltaïque atteignait presque 1500 GW dans le monde. Ce développement massif d'énergies renouvelables, en partie grâce à la chute des coûts de fabrication (-85 % pour le solaire et -49 % pour l'éolien sur la dernière décennie 5), a contribué à l'amélioration de l'accès à l'électricité dans le monde.

^{4 «} Global electric car sales by key markets, 2010-2020", Agence Internationale de l'Energie

⁵ Bloomberg

La Figure 2 montre l'évolution de la vente de véhicules électriques entre 2011 et 2020 où l'on peut constater un facteur 4 entre 2015 et 2020.

Défis de l'électrification pour la décarbonation

Actuellement, plus de 50 % des émissions de CO₂ dans le monde sont causées par l'industrie, le bâtiment et les transports 6. Ainsi pour atteindre les objectifs de neutralité carbone à horizon 2050, l'électrification massive de ces secteurs est un levier incontournable. A quelques variantes près, tous les scénarios (Stratégie nationale bas carbone, Agence Internationale de l'Energie, NREL 7) arrivent au consensus que la décarbonation implique une augmentation nette de l'électrification pour atteindre les objectifs de neutralité carbone à horizon 2050. La part de l'électricité dans la consommation finale

6 Agence Internationale de l'Energie7 National Renewable Energy Laboratory

d'énergie doit passer de 20 % en 2020 à 50 % en 2050 au niveau mondial.

Quelques éléments clés des feuilles de route

Agence Internationale de l'Energie

Dans son document «Net Zero by 2050», l'Agence Internationale de l'Energie met en avant plusieurs évolutions importantes et tout d'abord, la dynamique importante de l'évolution de la consommation électrique dans les pays développés et dans les pays en voie de développement et des économies émergentes comme le montre la figure 3 où l'on observe une consommation finale en électricité multipliée par 2 pour les pays développés et par 4 pour les économies émergentes quels que soient les secteurs.

Selon l'Agence Internationale de l'Energie, d'ici à 2030, la puissance installée annuelle d'énergie photovoltaïque et éolienne devrait être multipliée par 4 par rapport à 2020 et le nombre de ventes de véhicules électriques devrait être multiplié par 18. De même, au ni-

veau des usages, l'électrification des bâtiments est le facteur qui permet de réduire le plus les émissions de CO₂ de ce secteur (réduction de 16 % en 2030 et 44 % en 2050), la seconde étant l'efficacité énergétique (réduction de 15 % en 2030 et 31 % en 2050).

France

Dans les « futurs énergétiques 2050 » de RTE, plusieurs scénarios sont considérés parmi lesquels un scénario où les prévisions montrent une nette augmentation de la consommation électrique (+34 %) que ce soit dans le secteur du bâtiment, du transport, de l'industrie ou du couplage avec d'autres vecteurs comme par exemple la production d'hydrogène vert.

De son côté, Enedis, le principal gestionnaire de réseau français, prévoit également plusieurs scénarios de consommation et de production à l'échelle du réseau de distribution. Sur le volet consommation, il souligne l'importance du pilotage des véhicules électriques. En effet, dans le cas de scénarios de forts développements de véhicules

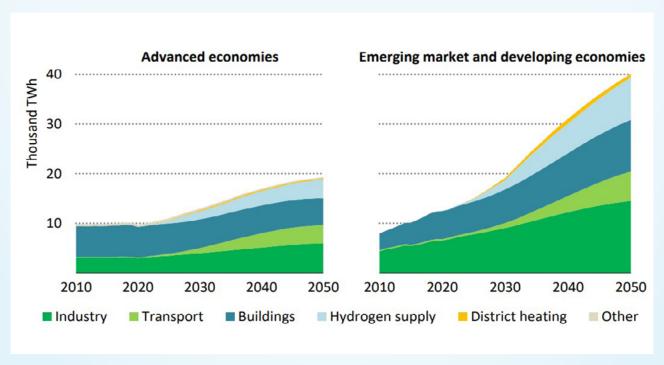


Figure 3 : Evolution de l'électrification des usages pour les pays développés et économies émergentes [1].

"L'intégration de la production renouvelable est un élément majeur puisqu'elle soulève des problématiques liées à la gestion de sa variabilité et de la stabilité du réseau. On peut perdre quasiment la totalité de la production éolienne ou solaire en peu de temps."

 électriques, ces derniers pourraient augmenter la pointe de +10 % dans le réseau de distribution si leur recharge a lieu simultanément au moment du pic journalier.

Enfin, le numérique qui représente actuellement environ 10 % de la consommation électrique pourrait augmenter de manière importante en raison notamment du développement croissant des usages du numérique à tous les niveaux et des technologies avancées de communication comme par exemple la 5G qui aurait une consommation électrique jusqu'à 3,5 fois plus élevée que la 4G. 8

Enjeux et défis pour le système électrique dans cette transition énergétique

Enjeux liés à l'intégration des énergies renouvelables et du véhicule électrique

L'intégration de la production renouvelable est un élément majeur puisqu'elle soulève des problématiques liées à la gestion de sa variabilité et de la stabilité du réseau. On peut perdre quasiment la totalité de la production éolienne ou solaire en peu de temps. Se posent alors des questions sur les réserves nécessaires pour pallier cette variabilité qui doivent être planifiées et optimisées tout en intégrant les diverses incertitudes. De plus, les énergies renouvelables sont de plus en plus connectées au réseau via de l'électronique de puissance ce qui

diminue l'inertie du système ⁹ global, affectant ainsi la stabilité globale du système.

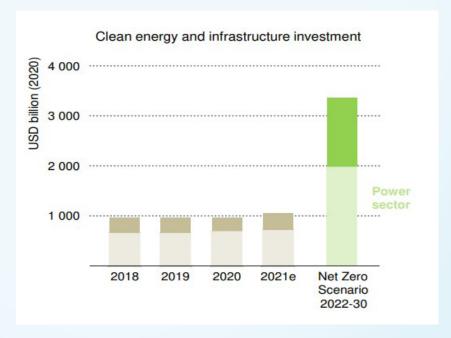
De même, les véhicules électriques considérés comme des charges variables et stochastiques pour le réseau peuvent amener des contraintes locales sur le réseau (pic de puissance si la gestion de la recharge est mal gérée, voire vieillissement des équipements) et des contraintes globales liées à la stabilité du système électrique c'est-à-dire le maintien de l'équilibre production consommation dans un contexte incertain. D'un autre côté, ils peuvent aus-

9 L'inertie des rotors des machines tournantes raccordées au réseau électrique leur permet de poursuivre leur rotation lors des fluctuations de la charge et de la production contribuant ainsi à la stabilité du réseau électrique. Les productions à base d'électronique de puissance n'ont en revanche pas d'inertie. si être considérés comme des sources de flexibilité pour le réseau, c'est le concept du V2G (*Vehicle to Grid*).

Défis à relever pour le système électrique

Le système électrique doit donc s'adapter rapidement pour la décarbonation et pour faire face au renouvellement de l'infrastructure, l'intégration des énergies renouvelables et des nouveaux usages. Il y a donc de nombreux défis à lever :

- défi lié au renouvellement et d'adaptation de l'infrastructure des réseaux électriques : l'Agence Internationale de l'Energie souligne un besoin d'investissements massifs dans le domaine des énergies propres et des réseaux électriques estimé en moyenne à 2 000 milliards de dollars/an sur la période 2022-2030 (soit un facteur 3 par rapport à 2020) et cela principalement en raison des nouveaux besoins en électrification comme le montre la figure 4.
- défi lié à la résilience que l'on peut classer en 4 niveaux :
 - maintien de l'équilibre production consommation dans un contexte incertain ;



I Figure 4 : Investissements nécessaires dans le secteur des énergies propres et les infrastructures [1].

8 Plum Energie

- garantie de la stabilité liée à la gestion de la variabilité et de l'inertie ;
 - cybersécurité ;
 - réchauffement climatique qui induit des questions sur la fiabilité du système et des perturbations de grande ampleur sur le réseau.

Cependant pour lever ces défis, l'infrastructure seule ne suffit pas et il faut de la flexibilité pour faire face aux diverses variabilités (production et usages) et aux diverses incertitudes, ce qui nécessite plus d'intelligence dans les réseaux. Ainsi, le système doit s'adapter vite malgré les dynamiques lentes de construction des réseaux électriques. Par exemple, la construction d'une ligne moyenne tension prend entre 1 et 3 ans et dans de rares cas complexes (traversée de voie ferrée ou d'autoroute) elle peut prendre jusqu'à 6 ans. La construction d'une ligne haute tension peut quant à elle facilement dépasser les 7 ans et souvent entre 10 et 15 ans. Il faut donc anticiper au plus tôt ces évolutions dans un contexte très incertain.

Planifier pour anticiper

La planification est un ensemble de décisions opérationnelles et des investissements dans le réseau électrique pour desservir les utilisateurs finaux (consommateurs et producteurs), prévoir à l'avance leurs besoins électriques (puissance injectée et soutirée), assurer la qualité et la continuité de l'alimentation tout en optimisant la rentabilité sur la durée de vie de ces investissements. Par exemple, en 2020, Enedis a investi 4 milliards d'euros sur son réseau de distribution et RTE 1,5 milliard d'euros sur le réseau de transport. En fonction des scénarios envisagés par Enedis, les investissements à prévoir sur la période 2020-2050 varient entre 1,5 et 8 milliards d'euros par an pour répondre aux enjeux de la transition énergétique. Il y a donc de nombreuses incertitudes que l'on doit intégrer dans la planification.

Historiquement, les quelques incertitudes étaient liées à l'évolution de la consommation et assez bien maîtrisées. Aujourd'hui, on doit prendre des décisions d'investissements conséquents avec des incertitudes autour des énergies renouvelables, du véhicule électrique, du développement des communautés d'énergie locales et des flexibilités. Il faut donc revoir les méthodes et modèles de planification pour intégrer ces incertitudes en passant de méthodes déterministes à des méthodes stochastiques avancées. Ces dernières permettent notamment de valoriser différentes options comme par exemple « attendre d'avoir plus d'informations », ou « déclencher l'investissement ». Elles doivent également intégrer l'option « activer de la flexibilité » qui peut alors permettre de différer voire d'annuler un investissement. Enfin, des méthodes d'évaluation des risques doivent permettre de prendre des décisions éclairées pour mieux arbitrer les investissements.

Nouvelles solutions émergentes

L'augmentation des ressources interfacées avec de l'électronique de puissance repose la question de l'intérêt du courant continu. L'émergence d'acteurs locaux et de communautés autour de la production de l'énergie et des nouveaux usages change le modèle du système électrique. On a donc un changement de paradigme économique et technique.

Evolutions techniques

- on passe de la vente de l'énergie sur la base de coût/prix marginal au paradigme d'offre de service dans lequel le coût marginal est 0 ;
- on passe de consommation passive à une synchronisation de la consommation sur la disponibilité de l'énergie en raison de la variabilité de la production d'énergie renouvelable ;

Les auteurs

Marie-Cécile Alvarez-Hérault eest



Maîtresse de conférences à l'Institut d'Ingénierie et de Management de l'Université Grenoble Alpes et au Labo-

ratoire de génie électrique de Grenoble (G2ELab/CNRS-GrenobleINP-UGA) dans l'équipe systèmes et réseaux électriques. Son principal domaine de recherche concerne la planification des réseaux de distribution et en particulier les décisions d'investissement sous incertitudes intégrant les nouveaux usages et flexibilités. Elle est également la titulaire de la chaire industrielle d'excellence Enedis (principal gestionnaire de réseau français de distribution) sur les smartgrids où elle définit et supervise des projets de R&D en lien avec la distribution électrique de l'avenir. Elle est impliquée dans des groupes de travail nationaux (ANCRE, ANRT-SNRE) et internationaux (CIRED, IEEE General Meeting) ; elle est membre du comité technique du CIRED et secrétaire générale de l'association Think SmartGrids.

Nouredine Hadjsaid est Professeur



des universités à l'Institut d'Ingénierie et de Management de l'Université Grenoble Alpes et effectue ses recherches au

sein du Laboratoire du Génie Electrique de Grenoble (G2ELab/CNRS-Grenoble INP-UGA). Son domaine de recherche concerne les réseaux intelligents ou « Smartgrids ». Il a dirigé le groupement d'intérêt économique (IDEA: Inventer la Distribution Electrique de l'Avenir) entre EDF, Grenoble INP et Schneider Electric de 2001 à 2013. Il est actuellement Directeur du laboratoire G2Elab et président du Conseil scientifique de Think Smartgrids France. Il est également membre du governing board et Vice-président New Initiatives and Outreach de IEEE Power & Energy Society (PES). Il a publié plus de 300 articles dans les conférences et revues internationales, il est auteur et co-auteur de 7 livres sur les réseaux électriques et les Smartgrids.

 l'émergence de microgrids ou encore la mise à disposition de blocks d'énergie de pair à pair (blockchain) entre différents acteurs au niveau local. On revient presque à la genèse des réseaux électriques à savoir la gestion des « poches/ cellules réseau » à l'échelle locale éventuellement interconnectées.

Evolutions économiques

Parmi les évolutions économiques, nous pouvons citer :

- l'évolution du réseau d'un statut de « coopérative globale » vers un « backup » ce qui rend nécessaire de bien définir les règles de partage et les coûts associés au réseau électrique ;
- la définition de marché local : en économie, plus la taille de marché est importante et plus on peut accéder à des sources compétitives ce qui apporte plus de valeur pour l'utilisateur final. La question se pose alors sur la fluidité d'un marché à une échelle réduite localement ;
- le maintien de la qualité et continuité de service compte tenu de la complexité croissante des réseaux électriques et

des défis auxquels ils doivent faire face, notamment la variabilité des énergies renouvelables, l'intégration du véhicule électrique à grande échelle, la baisse de l'inertie globale, le numérique et la cybersécurité, entre autres. La sécurité risque donc de devenir de plus en plus inhomogène et on s'orienterait alors vers une qualité de service sur demande.

Conclusion

L'électrification est indiscutablement la pierre angulaire de la décarbonation si on veut atteindre les objectifs à horizon 2050 avec une augmentation de la part d'énergie électrique finale de 30 % par rapport à aujourd'hui. Un élément clé est l'association efficacité et sobriété énergétique grâce à l'utilisation de la flexibilité. Le développement des technologies numériques permettra le développement de cette flexibilité en rendant le consommateur actif (on parle de consomm'acteur) mais également en permettant d'optimiser le système global. Il y a donc des défis techniques considérables à lever pour le système électrique et en particulier de nouvelles technologies à développer rapidement.

Historiquement, l'électrification a apporté des bénéfices socio-économiques majeurs et cette tendance se poursuivra dans les années à venir comme le souligne le Cambridge econometrics avec une projection de 1,8 million d'emplois supplémentaires, jusqu'à 23 milliards d'euros d'économies en dépenses énergétiques pour les ménages européens et voire même une augmentation du PIB de 2,1 % de l'Union européenne [1].

Références

- [1] Agence Internationale de l'Energie, «Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector,» octobre 2021. [En ligne].
- [2] International Renewable Energy Agency (IRENA), «Renewable capacity statistics 2021,» 2021. [En ligne].
- [3] Y. Arsalane, «Zéro émission nette à l'horizon 2050 Défis et opportunités pour le secteur de l'électricité,» chez Journée scientifique de la chaire SmartGrids, Grenoble, 2022.
- [4] E. E. a. C. econometrics, «Net Zero 2050 - Towards Fossil-Free Energy in 2050,» 2019. [En ligne].

Résumé

Les différentes feuilles de route nationales et internationales convergent vers la même conclusion : l'atteinte des objectifs de décarbonation à horizon 2050 passera par une intensification de l'usage du vecteur électrique (environ +30% à l'échelle mondiale) en raison de l'électrification de la mobilité, de certains usages industriels et de la digitalisation. Le réseau électrique, véritable colonne vertébrale du système global, doit donc s'adapter rapidement à ces évolutions qui posent de nombreux défis. En particulier, le niveau d'incertitude croissant lié à la variabilité de la production renouvelable et au développement du véhicule électrique augmente le risque de contraintes locales et globales. Ainsi la stabilité et la résilience du système électrique sont des défis majeurs qui doivent être anticipés par des efforts R&D importants dans différents domaines comme par exemple le développement de technologies en courant continu, le déploiement de la flexibilité et les microgrids.

Abstract

The various national and international roadmaps converge towards the same conclusion: achieving the decarbonization objectives by 2050 will require an increase in the use of electricity (approximately +30% worldwide) due to the electrification of mobility, some industrial uses and digitalization. The power grid, backbone of the overall system, must therefore adapt quickly to these changes, which pose many challenges. In particular, the growing level of uncertainty related to the variability of renewable production and the development of electric vehicles increase the risk of local and global constraints. Thus, the stability and resilience of the electrical grid are major challenges that must be anticipated through major R&D efforts in various fields such as the development of DC technologies, the deployment of flexibility and microgrids.



MAISON d'AMPÈRE

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



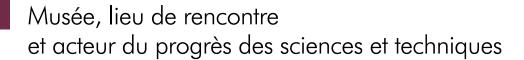












N D'AMPER

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



Vers une électronique soutenable dans un monde digital Enjeux et perspectives

Thomas Ernst

Directeur scientifique, CEA-Leti

Le rêve de la transition numérique et écologique se heurte à la matérialité des réseaux, serveurs, et objets connectés demandant pour leur production et leurs usages des matériaux rares et une quantité d'énergie croissante. Cet article passe en revue et propose des voies de recherche et développement permettant de préparer une électronique plus durable.

Introduction

Le progrès technologique depuis ces soixante dernières années est marqué par la naissance et le développement spectaculaire des technologies numériques. On constate ainsi une explosion des usages, accompagnée d'une évolution exponentielle de la quantité de données échangées sur internet et par voie de conséquence de l'empreinte énergétique et environnementale du numérique. Cette empreinte est toutefois contenue par l'évolution technologique qui permet une efficacité énergétique toujours meilleure et une utilisation de matières plus faible pour une fonction donnée. C'est l'augmentation du nombre de fonctions et de certains usages plus rapides que l'évolution technologique qui explique l'augmentation de l'empreinte du numérique.

Du côté des usages, une grande part des développeurs d'applications (à l'exception de l'électronique embarquée ou d'autres applications spécifiques) ont pris l'habitude de ressources de calcul et de stockage abondantes, accessibles, fiables et peu onéreuses. Ces quatre paramètres sont remis en question face à une disponibilité plus aléatoire de l'énergie et des métaux

rares mais aussi des défis concernant la gestion de la complexité d'une électronique toujours plus miniaturisée. Certains usages tels que les crypto-monnaies sont eux intrinsèquement extrêmement consommateurs d'énergie et augmentent significativement l'empreinte mondiale du numérique. Ainsi le centre de Cambridge pour les finances alternatives estime que la consommation d'énergie des cryptomonnaies serait de l'ordre de 100 TWh alors que la consommation mondiale d'énergie des centres de données serait d'environ 200 TWh.

A l'autre bout de la chaîne, la fabrication compte pour environ la moitié de la consommation énergétique, le reste étant dédié à l'usage (c'est une estimation très dépendante des applications et des usages).

Enfin, l'Europe a perdu depuis vingt ans de nombreuses parts de marché dans la conception et la fabrication de circuits intégrés et de systèmes électroniques. Si elle souhaite développer un numérique moins impactant, elle doit reprendre en main son destin en développant ses propres offres technologiques. Le *Chip Act* européen lancé par Thierry Breton est un pas dans cette direction.

Un développement électronique durable va demander de passer de l'adolescence, marquée par une croissance rapide des technologies, à la maturité, en repensant la chaîne de conception du numérique, depuis la mine jusqu'au recyclage, en passant par le logiciel. Nous verrons que les bras de leviers sont multiples pour cela.

Ainsi, de nombreuses perspectives de recherches s'ouvrent en termes de réduction de consommation d'énergie et de matières, de la fabrication à l'usage et au recyclage. Une manière d'appréhender ces possibilités est de comparer les ressorts du développement technologique à ceux du monde biologique. Inspiré par ce même vivant, nous synthétiserons un certain nombre de propositions qui pourraient permettre un développement du numérique plus respectueux de l'environnement.

Celles-ci pourront d'autant plus facilement être mises en œuvre qu'un changement économique et culturel aura lieu. Ainsi un modèle économique centré sur le service et non plus sur l'objet permettra plus facilement aux opérateurs économiques de concevoir, récupérer, réparer les objets numériques associés au service ainsi que les concevoir pour durer dans le temps. Les

 Etats peuvent accompagner ce mouvement par de nouvelle normes ou des actions de recherche spécifique.

Ainsi l'Etat français s'est déjà engagé par la loi Agec (loi anti-gaspillage pour une économie circulaire), promulguée en février 2020 et la loi REEN (Réduction de l'empreinte environnementale du numérique) du 15 novembre 2021. Il confirme cette volonté en novembre 2022 par la création d'un Haut comité du numérique écoresponsable.

L'évolution des technologies

Loi de Moore et de Koomey

Les technologies numériques actuellement utilisées sont issues du développement très récent des semi-conducteurs et en particulier des circuits intégrés à partir des années 70. C'est en 1959 que les ingénieurs Bill Kilby (Prix Nobel en 2000), et Robert Noyce inventent indépendamment le concept de circuit intégré aux Etats-Unis. Gordon Moore, Robert Noyce et Andrew Grove quittent peu après Faichild Semiconductor pour fonder Intel et inventent le microprocesseur. Les concepts qu'ils ont développés à cette époque sont toujours à la base du numérique actuel. Ils se basent sur l'architecture du mathématicien Von Neuman (1903-1957), inspirée des travaux du britannique Alan Turing et utilisée pour concevoir les premiers ordinateurs lors du projet Manhattan en 1944 puis les premiers calculateurs sans semi-conducteurs tels que l'ENIAC (1949).

Un système numérique est intrinsèquement un automate qui va lire un programme stocké dans une mémoire, exécuter des instructions qui s'alimentent de données stockées également dans une mémoire. Même une intelligence artificielle reste basée sur ce principe demeurant ainsi un automate... très élaboré.

La Loi de Moore est énoncée en 1962. C'est une loi autant économique que technique. Elle stipule (dans sa version actualisée de 1975) que le nombre de transistors

par puce peut doubler tous les deux ans grâce à la miniaturisation et réduire d'autant le coût par transistor. La loi de Moore met au pas une industrie pendant 60 ans qui, des fabricants d'équipements aux fournisseurs de logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO), aux concepteurs circuits et aux fabricants de puce travailleront ensemble dans des délais étonnamment courts, et en synchronisation parfaite, pour sortir une nouvelle génération de puces électroniques deux fois plus puissantes tous les 1,5 à 2 ans. La miniaturisation approche de ses limites et réduit son rythme actuellement autour des nœuds 2-3 nm (en développement).

Toutefois l'interconnexion 3D entre puces et intra-puces permet actuellement une augmentation continue du nombre de transistors dans un même boitier (dit package). Les puces de nouvelle génération sont composées de plusieurs puces connectées entre elles de manière ultradense en utilisant différentes technologies (interposeurs, chiplets, collage direct entre niveaux d'interconnexions de puces, etc.). Le PdG d'INTEL a ainsi annoncé cette année les premières puces avec un billion (« trillion » en anglais) de transistors pour la fin de la décennie, grâce à ces technologies 3D.

Notons qu'il y a dès à présent un vrai enjeu à garantir, à savoir un fonctionnement sans erreur des puces les plus complexes. Les ingénieurs de Google ont

Mémoire

Unité
de contrôle

Unité
arithmétique
et logique
Accumulateur

Entrée

Sortie

■ Figure 1 : Principe d'une architecture de Von Neuman encore à la base des architectures électroniques.

alerté en 2021 dans un papier appelé « Cores that don't count » sur ce qu'on appelle les Corruption Execution Errors (CEEs). Il devient d'après eux pratiquement impossible d'augmenter à 100 % la fonctionnalité des puces les plus complexes. Ainsi, des erreurs aléatoires difficilement détectables apparaissent lorsque la complexité augmente. Les applications critiques demanderont à l'avenir les mêmes précautions que celles déployées dans le secteur automobile ou aérospatial et devront être robustes et résilientes.

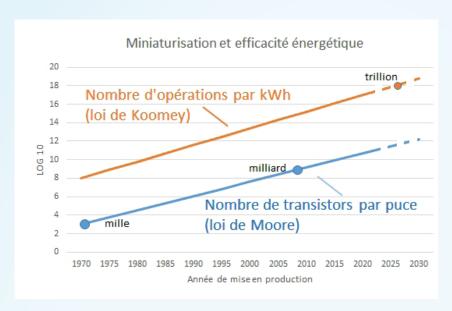
Un autre défi de taille posé par la complexité est la sécurité. Plus les systèmes sont complexes, plus il y a de portes potentielles pour les hackers. Ainsi les ressources et la place occupées pour la sécurité des systèmes augmentent fortement.

Grâce à la miniaturisation, la quantité d'énergie nécessaire pour un calcul donné est divisée par deux tous les 1,6 ans depuis 40 ans. C'est la loi de Koomey, du nom du professeur de Stanford qui a énoncé cette loi.

A notre connaissance, aucun autre secteur industriel n'a connu une telle progression d'efficacité énergétique et de performance dans l'histoire de l'humanité. Le supercalculateur d'hier devient le « téléphone » d'aujourd'hui. La puissance de calcul permet d'automatiser tous les secteurs, de révolutionner les loisirs, les télécommunications, le travail, la culture.

Ainsi il paraît difficile en termes d'efficacité énergétique de revenir en arrière puisque le même calcul élémentaire il a 10 ans consommait ... 65 fois plus d'énergie!

Toutefois il arrive à l'électronique ce que Jevons avait théorisé au XIXème siècle pour la machine à vapeur. Jevons s'était aperçu que plus la machine à vapeur était efficace et son coût accessible, plus son usage s'étendait et la consommation de charbon augmentait. On pourrait ajouter



I Figure 2: Tendances de la loi de Moore et de la loi de Koomey.

que cela a été vrai jusqu'à une stabilisation des usages puis le remplacement de cette technologie par d'autres, plus efficaces énergétiquement au XXème siècle. Ainsi pour nous le paradoxe de Jevons n'est pas une fatalité mais doit être intégré dans une stratégie globale de réduction de la consommation.

Les processeurs spécialisés

Une tendance forte depuis plus de dix ans vise à réduire la consommation d'une puce ou d'un système par plus de parallélisme (comme dans le cerveau) ou par de nouvelles architectures de circuit comme les accélérateurs neuro-morphiques ou même quantiques (Léquepeys, 2021). Cela va de pair avec plus de surface de silicium consommée et donc plus d'impact à la fabrication (Taylor, 2013, et Pirson, 2022).

Une autre tendance lourde est le développement d'une chaîne intégrée allant de la conception du circuit intégré à l'application (Académie des Technologies, 2022). Ainsi une activité réservée initialement à des vendeurs intermédiaires spécialisés (les vendeurs de circuits intégrés) devient stratégique pour des acteurs de produits finis ou de services. Tesla, Apple, Amazon, Facebook conçoivent maintenant eux-mêmes des circuits clés, notamment au cœur de l'intelligence de leur produit. Côté asiatique, Samsung réalise certains de ses composants clés depuis longtemps, lui donnant un avantage compétitif certain sur ses produits finis.

Une chaîne de conception de plus en plus intégrée doit permettre d'obtenir des économies à la fois d'énergie et de matière car ne seront utilisées que les ressources strictement nécessaires au produit. A contrario, utiliser des composants génériques entraîne une grande perte d'efficacité (mais un gain en coût de production).

L'impact du numérique

La controverse

Les techno-optimistes y voient plus d'avantages environnementaux que d'inconvénients : le télétravail et les téléconférences permettent de réduire les transports, l'électronique dans le véhicule a permis de réduire significativement sa consommation, l'industrie numérisée est plus propre et plus efficace énergétiquement... On pourrait ajouter que c'est grâce aux outils numériques que l'humanité mesure, modélise et prend

L'auteur

Thomas Ernst est directeur scientifique



au CEA- LETI. II est responsable de la stratégie et des partenariats de recherche à long terme. II a obtenu

son diplôme d'ingénieur en électronique, son doctorat à Grenoble INP et son habilitation à diriger les recherches (France) dans le domaine de la microélectronique. De 1997 à 2000, il a développé avec STMicroelectronics et le CNRS la caractérisation et la modélisation avancée du FD-SOI.

Il a ensuite rejoint le CEA-LETI où il a dirigé différents projets de recherche avec l'industrie et une startup. Il a dirigé l'équipe de développement des premiers nanofils et nanofeuilles CMOS empilés en 3D démontrés au niveau mondial. Thomas Ernst est l'auteur ou le coauteur de plus de 190 articles de revues techniques et communications lors de conférences internationales. Il est auteur ou coauteur de 20 brevets. Il est ou a été membre de différents comités internationaux de conférences. Il a reçu une bourse de recherche du Conseil européen de la recherche (ERC) pour mettre au point des systèmes intelligents intégrés multiphysiques.

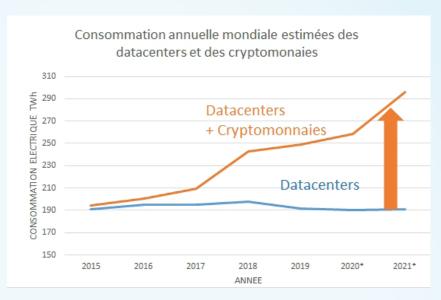
conscience des enjeux climatiques. Les technologies numériques nous donnent pour la première fois les outils pour comprendre les grands équilibres naturels et le résultat de notre action sur l'environnement, participant à la prise de conscience des scientifiques mais aussi du public ¹. Ainsi les travaux du GIEC se basent sur des données qui seraient inaccessibles sans les technologies numériques.

1 ADEME, « CHANGEMENT CLIMATIQUE : LES FRAN-ÇAIS DE PLUS EN PLUS ENGAGÉS ET FAVORABLES À DES MESURES FORTES DE POLITIQUE PUBLIQUE », communiqué de presse, 2021 Un certain nombre de groupes de recherches, d'associations ou d'organismes en France alertent sur l'impact environnemental croissant du numérique (énergie et matériaux) en phase de fabrication, d'usage et de fin de vie et prônent un usage du numérique modéré (*Lean ICT*) alertant sur l'impact à court terme de l'augmentation de la consommation d'énergie liée au numérique. Leurs travaux sont reconnus à l'international et influencent des initiatives parlementaires nationales telle la loi du 15 novembre 2021 visant à réduire l'empreinte environnementale du numérique.

Certains mouvements décroissants prônent une sortie de la high-tech jugée inutile et un retour complet à une vie proche de la terre ou a minima à la généralisation de la low-tech. Nous ne développerons pas la notion de low-tech ici. Bien adaptée à certain problèmes simples, l'utilisation de technologie ancienne n'est pas forcément efficace énergétiquement ou en termes d'économie matière. Il s'agit donc de choix pour chaque usage qui doivent être éclairés (nous préférons parler de Right Tech pour technologie nécessaire a minima).

Impact énergétique

L'impact énergétique du numérique est toujours sujet à controverse bien que les grandes estimations convergent. Il faut noter que ces chiffres se basent essentiellement sur des modèles alors que les opérateurs de réseaux d'énergie auraient probablement les moyens d'accéder à des données mesurées plus précises. Notons en particulier une polémique récente sur l'impact du streaming. Un expert de l'IEA a montré qu'il était relativement faible face aux autres usages, démontant ainsi une croyance populaire ².



♣ Figure 3 : Estimations de la consommation mondiale des centres de données et des cryptomonnaies. (sources : IEA, Statista, University of Cambridge)

Finalement, le numérique serait à l'origine de 4,2 % de la consommation mondiale d'énergie primaire et de 3,7 % des émissions de gaz à effet de serre (ARCEP, 2020). Le chiffre est plus faible en France grâce à la part du nucléaire. Ces chiffres sont toutefois en croissance. L'augmentation relative de l'empreinte du numérique serait d'après le Shift Project de 9 % par an (Ferreboeuf, 2018).

A ce constat s'oppose l'impact positif du numérique : réduction des transports (téléconférences), optimisation des procédés de fabrication (moins d'énergie et de matière), énergie et transports dits verts, villes et bâtiments dits intelligents. Ainsi Schneider Electric prévoit de faire économiser 800 millions de tonnes de carbone à ses clients et s'applique à luimême un objectif de neutralité carbone en 2030 ³.

Il nous semble donc insuffisant de considérer le numérique dans son ensemble mais plutôt par grandes applications ou infrastructures (Edge, réseau de télécom, centres de données...). Ainsi, la consommation électrique des centres de données est relativement stable depuis plus de 5 ans

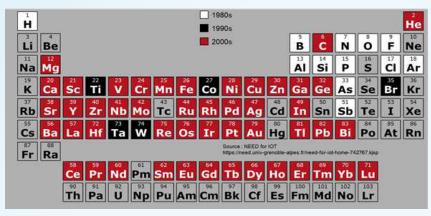
Cela permet ainsi de pointer les usages les plus consommateurs de ressources. Par exemple, la consommation de cryptomonnaies est évaluée au cours du temps par le Centre pour la finance alternative de l'université de Cambridge. Contrairement aux centres de données classiques, les fermes de minage des cryptomonnaie sous leur forme actuelle ont un impact croissant et de premier plan depuis 5 ans. Intrinsèquement la méthode utilisée dite de preuve de travail est très énergivore. De nouveaux protocoles dits de preuve d'enjeu (tel que celui développé par Ethereum) consommerait beaucoup moins d'énergie. Le cas des cryptomonnaies nous montre l'importance de l'écoconception et la prise en compte en amont de la consommation d'énergie (et de matière) nécessaire lors de la création d'un nouveau service numérique.

Les matériaux

L'impact du numérique (et des nouvelles technologies en général) en termes de consommation de matériaux rares a été longtemps sous-estimé en Europe et aux Etats-Unis. Un téléphone portable compte plus d'une cinquantaine de ma-

² https://www.iea.org/commentaries/the-carbon-footprint-of-streaming-video-fact-checking-the-headlines; https://theshiftproject.org/article/shift-project-vraiment-surestime-empreinte-carbone-video-analyse/

³ https://www.se.com/fr/fr/about-us/sustainability/climate-commitment.jsp



■ Figure 4 : Classification périodique des éléments avec, en blanc, ceux utilisés dans le numérique dans les années 80, en noir, dans les années 90 et, en rouge, depuis les années 2000 (cumulatif).

••• tières premières venant pour la grande majorité de l'extérieur de l'Europe. La Chine a compris depuis longtemps l'intérêt de s'assurer un approvisionnement à long terme en terres rares et autres métaux par une production interne et externe suffisante (Pitron 2018, 2021).

Des perspectives importantes existent pour réduire la consommation de matériaux critiques et de fluides à la production. Cela peut être réalisé en récupérant et recyclant de manière plus efficace les gaz, fluides et matériaux non utilisés. Des ruptures en termes de quantité de matière utilisée peuvent être espérées par le développement de nouveaux procé-

dés de fabrication par exemple en utilisant des couches monoatomiques ou localisées de matériaux critiques ou en leur substituant quand cela est possible des matériaux plus abondants ou biosourcés.

Vers une conception et un usage responsable du numérique

Une convergence entre la technologie et l'environnement est donc non seulement possible mais souhaitable. Cela suppose une meilleure compréhension des deux mondes, de leur logique propre et de leurs contraintes. Un axe prometteur qui se développe actuellement est le biomimétisme. S'inspirer de la nature doit permettre d'aller vers une plus grande économie de matière et d'énergie ⁴. Dans le tableau ci-dessous, nous proposons quelques points de comparaison entre le monde numérique et biologique. L'idée de la démarche que nous ne commenterons pas pour chaque ligne est de changer la logique de conception.

Ainsi passer de produits standards hightech surdimensionnés à des produits dont la puissance est adaptée à l'usage prévisible (*right-tech*) est une première voie. Développer des technologies à base de matériaux abondants et recyclables facilement est un défi majeur qui pourrait faire l'objet de recherches ces cinquante prochaines années.

Enfin la conception globale du matériel au logiciel est une tendance lourde et va au-delà du processeur spécialisé. Elle consiste à développer les outils et méthodologies nécessaires (Quisbert, 2022) pour que seules les données utiles soient transmises ou conservées, et que les codes soient plus efficaces. C'est un très

4 https://ceebios.com/biomimetisme/

| Numérique | Biologique |
|--|---|
| Complexité à croissance exponentielle au-delà du nécessaire (Produits standards) | Complexité adaptative et progressive (seulement ce qui est nécessaire) |
| Séparé de l'environnement naturel | En perpétuel interaction avec son environnent |
| Totalement prédéterminé (automate) | Reconfigurable, adaptable |
| Ressources minérales parfois rares et polluantes | Ressources organiques ou minérales disponibles |
| Fabrication énergivore | Naissance et croissance peu énergivore |
| Besoin d'une alimentation en énergie | Transforme sa propre énergie avec les ressources disponibles de l'environnement |
| Energie très faible pour un calcul élémentaire | Energie faible pour un système complexe |

Tableau 1 : Eléments de comparaison entre un objet numérique et un organisme biologique.

 grand chantier qui permettra d'aller vers un numérique plus fiable et moins énergivore.

> Dans le tableau ci-contre, nous reprenons un ensemble non exhaustif d'actions qui peuvent être menées pour réduire l'empreinte du numérique.

Conclusion

Une approche globale, de la mine aux déchets, avec une conception combinée matérielle et logicielle doit permettre, accompagnée par des normes et la législation, de réduire l'impact du numérique.

Notons que la France est en pointe sur cette démarche avec en amont des études et rapports d'associations ou d'organismes alimentés par des travaux de recherche : GreenIT, EcoInfo, ARCEP, ADEME, TheShiftProject.

Quelques industriels tels que STMicroelectronics ont été les premiers dans le monde de la microélectronique à faire un bilan matière et énergie et s'engage à un bilan neutre en carbone pour 2027.

Notons toutefois que la France dispose d'un degré de liberté restreint pour deux raisons :

- la majorité des logiciels et matériels grands publics viennent d'Asie et des Etats-Unis.
- la plupart des règlementations proviennent de l'Europe (RoHS, EU Ecodesign directive 2009, directive 2012 sur les DEEE).

Au niveau européen, les industriels s'organisent pour promouvoir un mode de développement de numérique vert à travers la « coalition européenne pour le numérique vert ». Toutefois un travail commun avec les acteurs non industriels de la recherche technologique doit s'amplifier afin de s'assurer de la sincérité de la démarche mais aussi anticiper de vraies ruptures technologiques.

Notons l'initiative remarquable de l'entreprise néerlandaise Fairphone qui propose des téléphones durables et réparables. Même pour une telle entreprise, portée dès sa création par des valeurs environnementales fortes, les niveaux

> L'extraction et les matériaux

· Développer des modes d'extraction peu ou pas polluants.

> La Production

- Procédés consommant moins d'énergie, d'eau ou de matière
- Réduction et recyclage des déchets, matériaux biosourcés
- · Moins de matériaux critiques, couches mono-atomiques, chimie douce
 - · Augmentation de la fiabilité et de la durabilité des composants

> Conception des circuits

- · Composants et circuits pour la très basse consommation
- Nouveaux paradigmes de calcul et processeurs spécialisés, architectures bio-inspirées
- Conception de circuits fiables, résiliant aux erreurs et aux attaques.

> Conception des (sous-)produits

- · Analyse globale de cycle de vie
- Ecoconception globale (y compris logicielle) durabilité réparabilité résilience (pour les applications critiques) - réutilisabilité - recyclabilité
 - Utilisation de matériaux biodégradables ou recyclables (structures, packaging ...)
 - Emploi de technologies adaptées pour des marchés émergents

> Applications et usages / vers un numérique responsable

- Analyse du cycle de vie de la donnée : éviter la transmission et le stockage de données inutiles
- Repenser toute la chaîne de conception favoriser des solutions sur mesure. Optimiser le logiciel (Bordage & Lemaire, 2022)
- Repenser les réseaux pour réduire leur empreinte énergétique et augmenter leur résilience
 - Remplacer l'obsolescence programmée ou subie par des équipements évolutifs et réparables
 - Définition de normes et de grilles de notation sur l'impact écologique des produits.

> Fin de vie

- Reconfigurer, réutiliser
- Développer des méthode de recyclage et de récupération de métaux non polluants

■ Tableau 2 : Pistes d'éco-conception pour le numérique (Ernst, 2021).

 d'action restent limités par les composants eux-mêmes dont la disponibilité est parfois limitée... à 5 ans...

> Là encore, il nous semble important que les normes prévoient une durée de vie et une disponibilité des composants pendant 10 ans minimum afin de permettre un taux de renouvellement plus faible du matériel.

> Les initiatives récentes de la commission européenne au travers du *Chip Act* doivent permettre d'aller plus loin.

Si l'Europe arrivait à redevenir un acteur majeur de la production de composants électroniques, elle pourrait reprendre son destin en main et serait en mesure à plus long terme d'appliquer l'écoconception de la mine au déchet proposée ici.

Toutefois se cantonner au seul soutien du monde des semi-conducteurs peut être très limitant voire contre-productif. En effet, c'est toute une transformation de la logique économique du secteur qui est sans doute en route avec une tendance à une conception intégrée, des composants au produit final. Ainsi Apple, Tesla, Samsung et d'autres conçoivent de plus en plus leurs propres puces électroniques. L'Europe doit soutenir les entreprises en haut de la chaîne de la valeur et les inciter à investir dans les composants. C'est comme cela que les produits numériques pourront être globalement beaucoup plus efficaces énergétiquement car optimisés globalement.

Références

- · Académie des Technologies. (2022). Les technologies matérielles supports du numériques du futur Trois questions.
- ARCEP. (2020). Pour un numérique soutenable Rapport d'étape. https://www.arcep.fr/.
- Bordage , F., & Lemaire, T. (2022). Ecoconception web : les 115 bonnes pratiques. Eyrolles.
- Ferreboeuf, H. (2018). Lean ICT Pour une sobriété numérique. The Shift Project.
- Léquepeys, J.-R. (2021). Overcoming the Data Deluge Challenges with Greener Electronics. ESSCIRC ESSDERC Proceedings (IEEE).
- Monnier, E. (2022). La madédiction de l'infini dans hors Serie 3, Infini. Epsiloon, 71-78.
- Pitron, G. (2018). La guerre des métaux rares: La face cachée de la transition énergétique et numérique. Ed. Les liens qui libèrent.
- Pitron, G. (2021). L'enfer numérique: Voyage au bout d'un Like. Ed. Les liens qui libèrent.
- Taylor, M. B. (2013). IEEE A Landscape of the New Dark Silicon Design Regime. IEEE Micro, vol. 33, no. 5, 8-19.
- T. Pirson et al. «The Environmental Footprint of IC Production: Meta-Analysis and Historical Trends,» ESSDERC 2022, pp. 352-355
- E. Quisbert "Méthodologie de conception pour les systèmes IoT durables » thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2022
- T. Ernst, J.-P. Raskin, "Towards circular ICT: from materials to components" Hipeac Vision 2021, www.hipeac.net.

Résumé

L'impact du numérique devient un sujet d'actualité dans un contexte où la sobriété énergétique est un enjeu écologique de premier plan. Le rêve d'un monde virtuel se heurte à la matérialité des réseaux, serveurs, et objets connectés demandant pour leur production et leurs usages des matériaux rares et une quantité d'énergie croissante. Les progrès énormes depuis 50 ans en termes d'efficacité énergétique sont absorbés par des développements applicatifs spectaculaires mais énergivores. Par ailleurs la miniaturisation et la complexité des circuits va atteindre des limites physiques, mais aussi de fiabilité et de sécurité. Plus généralement, il est urgent de repenser l'électronique afin d'aller vers une conception plus durable, de la mine à la production et à la conception des logiciels et profiter ainsi du potentiel énorme du numérique dans les nombreux secteurs. Parmi ces derniers citons la meilleure gestion des ressources ou l'élaboration et la diffusion des connaissances. Une conception globale, du matériel au logiciel et à l'application, pourrait faire gagner plusieurs ordres de grandeur en efficacité énergétique. Enfin, si l'Europe veut être acteur de ce changement, elle doit réinvestir le secteur et créer ses propres championsl.

Abstract

The impact of digital technology is becoming a topical issue in a context where energy efficiency is a major ecological issue. The dream of a virtual world collides with the materiality of networks, servers, and connected objects demanding for their production and uses rare materials and an increasing amount of energy. The huge progress in energy efficiency over the past 50 years has been absorbed by spectacular but energy-intensive application developments. Moreover, the miniaturization and complexity of the circuits will reach physical limits, but also reliability and safety. More generally, it is urgent to rethink electronics in order to move towards a more sustainable design, from mining to software production and design, taking advantage of the enormous potential of digital technology in the many sectors where it makes it possible to better manage resources and develop and disseminate knowledge. A global design of the hardware to the software and application could save several orders of magnitude in energy efficiency. Finally, if Europe wants to be a player in this change, it must reinvest the sector and create its own champions.

Proposition thermodynamique vers un monde plus électrique

Le système électrique est généralement identifié comme le vecteur majeur de la transition énergétique, que ce soit pour des raisons intrinsèques de valorisation des productibles décarbonés ou pour sa capacité à offrir des substitutions d'usage dans le cadre d'une migration vers l'électricité. La soutenabilité de cette évolution devra s'apprécier dans un cadre thermodynamique global valorisant non seulement les qualités opérationnelles du vecteur électrique mais dessinant également des horizons crédibles en termes d'exploitation des gisements de matière fonctionnelle et de recours aux stratégies de contrôle et de digitalisation, notamment par la rétroaction qu'ils exercent sur le système énergétique lui-même.

Vincent Mazauric

Schneider Electric

Sergio Ciliberto

ENS Lyon

Préambule

du réseau électrique.

L'électricité s'est historiquement déployée pour accompagner le développement de ses usages spécifiques : éclairage, technologies de l'information et de la communication, électrolyse, etc.; pour sa facilité de transport et ses performances élevées, notamment la puissance spécifique de la conversion magnéto-mécanique ; et sa forte disponibilité caractérisée par une LOLE ¹ de quelques heures par an en Europe par exemple [1]. Désormais, l'électricité est également considérée comme le

1 Résultat d'un travail statistique, la « Loss of Load Expectation » est le nombre d'heures prévu pendant lesquelles la charge ne pourra pas être couverte par l'ensemble des moyens de production à disposition

vecteur universel de décarbonation de l'énergie ce qui constitue en soi une triple-bifurcation par rapport à [2] :

- son usage relativement modeste (aujourd'hui autour de 20 % de l'énergie finale);
- sa contribution aux émissions globales de gaz à effet de serre (environ 45 % des émissions anthropiques mondiales);
- un rendement largement déprécié par la génération conventionnelle d'origine thermique.

Dans cette compétition entre vecteurs d'énergie vers la « soutenabilité », la migration vers l'électricité imposait de disposer d'une description optimale du système électrique : c'est l'objet d'un premier article dont le but est de clarifier le lien qui existe entre thermodynamique et électromagnétisme basse fréquence, et plus précisément entre la loi de l'induction de Faraday et la réversibilité. Et puisqu'il s'agit également de célébrer le Bicentenaire des lois de l'électrodynamique d'Ampère, une large place sera consacrée à retrouver l'état de l'art!

L'article suivant revisite le fonctionnement des systèmes d'énergie au regard des concepts et grandeurs thermodynamiques globaux précisément introduits dans le premier article et montre comment les contraintes d'exploitation éclairent et conditionnent les choix futurs. On montre en particulier que les compromis techniques à réaliser ne s'expriment pas uniquement dans une tension entre la demande et une offre décarbonée mais devront reposer sur un arbitrage plus global entre énergie, information et matière pour réussir la transition énergétique.

Bibliographie

- [1] A. Anagnostou, S. Giguet, Z. Fučík, T. Jeźyński, R. Kok, N. Kouveliotis, et al., «Electricity in Europe 2017: Synthetic overview of electric system consumption, generation and exchanges in 34 European countries,» European Network of Transmission System Operators for Electricity, Brussels, Belgium, December 2018.
- [2] «Energy Systems,» in *Mitigation of Climate Change*. vol. 3, J. Skea, Ed., ed Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, pp. 6/1-217.

Proposition thermodynamique vers un monde plus électrique

I – Des principesthermodynamiques auxéquations de Maxwell

Vincent Mazauric

Schneider Electric, Grenoble

Introduction

Qu'elles soient axiomatiques [1] ou dérivées du formalisme Lagrangien [2], les équations de Maxwell résultent d'une théorie d'évolution du second ordre (en temps) qu'il est avantageux de représenter grâce à des diagrammes de Tonti (Figure 1-a) afin de [3, 4]:

- faire apparaître les symétries naturelles des phénomènes électromagnétiques ;
- rendre compte du caractère étendu des phénomènes électromagnétiques, au-delà de la matière et notamment dans le vide, et favoriser l'écriture de lois de comportement locales.

A l'échelle macroscopique, les sources de charges, en l'espèce positives ou négatives, et de courants résultant de leurs éventuels déplacements, sont régularisées grâce à un lissage spatial pour définir :

- la densité de charges « libres » 1 P ;
- la densité de courants (de charges) libres];

1 Plus rigoureusement la densité moyenne de charges.

de sorte que la relation de conservation de la charge conduit à définir deux champs de type « sources » vérifiant les deux équations de Maxwell-Gauss et Maxwell-Ampère [5].

L'existence chimique de milieux conducteurs :

- exhibant des charges mobiles suffisamment denses, *i.e.*, dont le déplacement est caractérisé par un libre parcours moyen ℓ délimitant un volume dont le cardinal de charges mobiles est comparable au nombre d'Avogadro \mathcal{N} ;
- présentant une densité de charge moyenne P évanescente à suffisamment basse fréquence pour « neutraliser » les effets électrostatiques au profit d'effets magnétiques pourtant relativistes, même aux faibles vitesses de déplacement, mais amplifiés par le foisonnement des charges ;
- permettant d'envisager des déplacements de charges donc des courants libres –sous l'effet d'un champ électrique modeste, i.e. sans énergie d'extraction. Sans le dire toujours explicitement, cette possibilité ne se manifeste qu'à une échelle suffisamment macroscopique où la complexité des effets collisionnels entre charges fixes et mobiles ne peut être décrite que dans un formalisme statistique :
- postulant une perte d'information, c'està-dire renonçant à décrire la dynamique des charges selon une évolution déterministe;

• par conséquent à l'origine d'un dégagement de chaleur, l'effet Joule, invariant par renversement du temps pour traduire son caractère irréversible ².

La *loi d'Ohm* exprime cette causalité entre champ électrique appliqué et densité de courant libre :

- elle brise la symétrie de la maison de Maxwell (Figure 1-b) ; mais
- elle offre la possibilité d'une théorie de l'électromagnétisme du premier ordre en temps connue sous l'approximation des régimes quasi-permanents [7]. Selon cette approximation, les variations temporelles sont suffisamment faibles pour que les courants de déplacement $\partial \mathbf{D}/\partial t$ soient négligeables devant les courants de charges mobiles \mathbf{J} dans les conducteurs ³ de telle sorte que la conservation de la charge s'exprime dans la loi des nœuds (ou première loi de Kirchhoff) [8].

Le point de vue défendu ici consiste à repartir de l'observation d'une situation électromagnétique au plus bas ordre en temps pour lui appliquer les principes thermodynamiques auxquels elle ne peut pas échapper.

² L'expression phénoménologique la plus simple consiste alors à adopter une densité de pertes Joule quadratique de la densité de courant.

³ Ne peut alors subsister dans les conducteurs qu'une densité de charge libre stationnaire, en fait nulle pour garantir l'invariance galiléenne des pertes Joule.

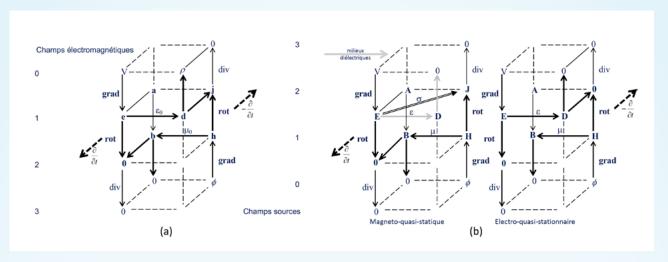


Figure 1 : Les « maisons de Maxwell » logeant les phénomènes électromagnétiques aux échelles particulaire (a, lettres minuscules) et macroscopique dans la limite des régimes quasi-permanents (b, lettres majuscules): Alors que la profondeur rend compte de l'évolution temporelle (flèches pointillées), les barreaux horizontaux traduisent les propriétés comportementales de la matière et les piliers verticaux caractérisent les propriétés spatiales. Ainsi les champs sources (déplacement électrique d,D; champ magnétique h,H) et complémentaires (champ électrique e, E; induction magnétique b, B) électromagnétiques ainsi que leurs potentiels apparaissent comme la réalisation de formes différentielles de degré 0 à 3, respectivement tordues et droites. Avec la convention temporelle adoptée, les phénomènes magnétiques apparaissent en vue arrière (perméabilité magnétique μ) alors que les phénomènes électrostatiques (permittivité diélectrique E) apparaissent en vue de face. A l'échelle macroscopique (b) la loi d'Ohm (conductivité σ , trait double) brise dans les conducteurs la symétrie de la maison de Maxwell mais permet d'envisager des occupations simplifiées correspondant aux limites magnéto-quasi-statique (gauche) et électro-quasi-stationnaire (droite) dans lesquels les enchainements conduisant aux phénomènes propagatifs (a) sont interrompus (adapté de [6]).

Phénomènes statiques

Pour décrire un système complexe dont le nombre de particules en interaction est de l'ordre du nombre d'Avogadro \mathcal{N} , on adopte une description statistique. Dans ce formalisme, l'information manquante sur un système est procurée par son entropie de Shannon S [9] et son état d'équilibre thermodynamique satisfait au maximum de l'information manquante respectant la connaissance macroscopique [10], à savoir 4 :

- l'énergie moyenne U également appelée énergie interne - pour un système échangeant de la chaleur avec un thermostat et du travail avec l'extérieur;
- le flux magnétique φ et la charge Q soutirée à la masse dans le contexte spécifique de l'électromagnétisme.

Une description équivalente consiste à caractériser l'équilibre du système par ses variables d'état naturelles qui sont respectivement la température T du thermostat, les conditions aux limites X imposées par les actionneurs (le plus souvent l'angle mécanique d'une machine), ainsi que les courants débités par les générateurs I et le potentiel de la masse V_o. L'équilibre est alors décrit par une fonction d'état à valeur énergétique, en l'espèce l'enthalpie libre électromagnétique $G(T,I,V_0,X)$:

· correspondant à l'équilibre thermodynamique résultant du couplage du champ électromagnétique avec ses sources et le thermostat 5, supposés suffisamment dominants pour n'opérer que des transformations réversibles

tout en maintenant les consignes sur les variables d'état lors de l'évolution du champ, donc s'obtenant par transformations de Legendre successives à partir de l'énergie interne [11] :

$$G = U - T S - (\varphi I + QV)$$
 (1)

- dont l'invariance pour toute transformation des champs sources conservant les consignes sur les variables d'état électriques procure les équations de Maxwell statiques [12];
- réalisant le minimum d'un potentiel de Gibbs dont la convexité à l'équilibre procure les lois de comportement électrostatique et magnétique, respectivement la permittivité diélectrique & et la perméabilité magnétique μ (figure 1-b) ou, plus globalement sous forme de constantes localisées, les matrices capacitances C, et inductances Lii.

magnétique qui ne peut être maintenu que par le couplage au générateur de courant qui lui donne naissance. L'énergie emmagasinée par cet équilibre thermodynamique est dissipée en chaleur dans l'étincelle de rupture subséquente à l'ouverture du circuit. l'induction Un champ électrique dans un milieu diélectrique peut, par contre, être créé par des charges (situation Le premier principe de la thermodynaénergétique) ou par des conducteurs connectés à des

5 La description enthalpique est intrinsèque au champ **Evolution quasi-statique:** de la réversibilité à

mique impose que la puissance méca-

générateurs de tension (situation enthalpique).

⁴ Dans toute la suite de cette publication, les grandeurs en lettre romane (respectivement italique) désigneront les variables d'état, les données d'entrée fixées par l'opérateur extérieur ou les valeurs prises à l'équilibre et/ou à l'optimum (respectivement les fonctionnelles et les grandeurs génériques macroscopiques prises hors d'équilibre).

- ••• nique P_{mec}=∑ **F·X** reçue des actionneurs par le champ sse conserve entre les grandeurs suivantes (figure 2):
 - la variation d'énergie cinétique $E_{\rm cin}$ embarquée par les différents organes mobiles appartenant au système dans le référentiel d'étude supposé galiléen 6 ;
 - la chaleur dégradée sous forme d'effet Joule vers le thermostat $T \frac{dS_{th}}{dt}$ en provoquant un accroissement de son entropie S_{th} ;
 - la variation d'énergie interne du champ électromagnétique ;

pour s'écrire :

$$\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}E_{\mathrm{cin}}}{\mathrm{d}t} = P_{\mathrm{mec}} - T\frac{\mathrm{d}S_{\mathrm{th}}}{\mathrm{d}t} \quad (2)$$

Pour être complète, une approche thermodynamique doit également permettre de décrire l'évolution du système sous

6 On intègre directement le théorème de la puis-

sance cinétique dans l'expression du 1er principe.

des variations de ses variables d'état. Afin de rester cohérent avec l'hypothèse d'information manquante maximale caractérisant les états d'équilibre, l'entropie du système isolé global ne peut que croître au cours du temps (second principe de la thermodynamique) :

$$\frac{\mathrm{d}S_{\mathrm{th}}}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t} \ge 0 \quad (3)$$

Pour une transformation monotherme, on retrouve que la puissance mécanique transmise au champ électromagnétique $P_{\rm mec} - dE_{\rm cin}/dt$ est supérieure à sa variation d'énergie llibre F = U - TS [10]:

$$P_{\text{mec}} - \frac{dF}{dt} - \frac{dE_{\text{cin}}}{dt} =$$

$$P_{\text{Joule}} + T\frac{dS}{dt} \ge 0 \qquad (4)$$

si bien que pour assurer l'évolution la plus réversible possible d'une infrastructure énergétique ne se dégradant pas $(dS / dt = 0)^7$, une première condition

7 On néglige notamment ici les frottements méca-

niques, notamment aux paliers des machines.

l Figure 2 : Environnement du champ électromagnétique : la régie électrique dispose d'une machine monotherme pour transmettre du travail mécanique de l'actionneur \mathbf{X}_1 à l'actionneur \mathbf{X}_2 (animés des vitesses généralisée $\dot{\mathbf{X}}_i = \mathbf{d} \, \mathbf{X}_i / d\mathbf{t}$ et exerçant les forces généralisées \mathbf{F}_i sur le champ). Pour cela elle peut régler l'excitation I d'un inducteur (par exemple le rotor d'une machine). L'ensemble échange de la chaleur avec le thermostat \mathbf{T} et des charges avec une masse au potentiel \mathbf{V} . L'énergie de couplage entre le champ électromagnétique et le générateur s'écrit ($\phi \mathbf{I} + \mathbf{Q} \mathbf{V}$) où $\phi \mathbf{e} - \partial \mathbf{G} / \partial \mathbf{I}$ est le flux magnétique et $\mathbf{Q} = -\partial \mathbf{G} / \partial \mathbf{V}$ la charge soutirée par le système à la masse. En grisé le périmètre du champ électromagnétique et des couplages sur lequel s'opère l'enthalpie libre électromagnétique (1).

d'optimalité consisterait à minimiser les pertes Joule :

$$P_{\text{mec}} - \frac{dF}{dt} - \frac{dE_{\text{cin}}}{dt} = \min P_{\text{Joule}} \ge 0 \quad (5)$$

Cependant, la condition précédente n'est pas suffisante pour retrouver la *loi de Faraday*. L'expérience montre que l'on doit également tenir compte de l'inertie qu'oppose le champ aux variations que lui imposent ses sources (loi de Lenz) et considérer l'énergie séquestrée dans les couplages pour exprimer la condition (faible) de réversibilité. En considérant l'enthalpie libre G (1), on aboutit à une autre condition d'optimalité au sens de la réversibilité ⁸:

$$P_{\text{mec}} - \frac{dG}{dt} - \frac{dE_{\text{cin}}}{dt} = \min \left(P_{\text{Joule}} + \frac{d(\varphi I + QV)}{dt} \right) \quad (6)$$

qui procure l'équation de Maxwell-Faraday et la loi d'Ohm avec mouvement par passage aux champs continus [13]. Ainsi, la relation précédente décrit totalement l'évolution quasi-statique du champ électromagnétique :

- l'argument du membre de droite inclut la contribution entropique (2nd principe) pour un système électrique ne se dégradant pas sous l'effet d'une transformation isotherme;
- son minimum, modéré par la loi de Lenz, traduit une condition (faible) de réversibilité qui implique localement la loi de Faraday
- l'équilibre avec le membre de gauche réalise globalement la conservation de l'énergie (1^{er} principe) et exprime le bilan exergétique du système global [14].

On retiendra que la loi de Faraday apparaît comme la conséquence *locale* d'une condition *globale* de réversibilité qui prolonge, par sa signification thermodynamique, les approches variationnelles classiques de l'électromagnétisme [15].

 $[\]begin{array}{c|c} & T \\ \hline \\ X_1 \\ \hline \\ F_1 \cdot \dot{X}_1 \\ \hline \\ \mu, \varepsilon \\ \hline \\ \mu, \sigma \\ \hline \\ I, V \\ \hline \\ \hline \\ I, V \\ \hline \\ \end{array}$

⁸ Malheureusement cette réalisation expérimentale est moins favorable que le minimum « multi-statique » obtenu grâce à (5) en raison du caractère positif de la perméabilité magnétique.

••• Désagrégation spatiale

Pour des questions de conception ou de pilotage des systèmes d'énergie, l'équation de Poynting permet de « localiser » les contributions énergétiques sur chaque sous-domaine Ω_i pour définir sa puissance électrique :

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{\text{elec}}(\Omega_i) &= \\ \mathbf{P}_{\text{Joule}}(\Omega_i) + \frac{\mathrm{dF}(\Omega_i)}{\mathrm{d}\,t} - \left(\mathbf{P}_{\text{mec}}(\Omega_i) - \frac{\mathrm{dE}_{\text{cin}}(\Omega_i)}{\mathrm{d}\,t}\right) \end{aligned} (7)$$

de telle sorte que pour une partition de l'espace, l'équation exergétique (6) impose la relation de fermeture :

$$\sum_{i} P_{\text{elec}}(\Omega_i) = 0^{9} (8)$$

Dans le cas d'un domaine Ω_i définissant un dipôle électrique traversé par le courant I_i on définit la tension comme la puissance unitaire :

$$U_i = \frac{P_{\text{elec}}(\Omega_i)}{I_i} \quad (9)$$

L'équipotentialité aux nœuds impose alors la loi des mailles (ou seconde loi de Kirchhoff) [8].

Décomposition multiéchelles

Parallèlement, le caractère quadratique de la fonction d'état (1) et de la fonctionnelle de puissance (6) permet une analyse de Fourier spatiale qui met seulement en évidence quelques échelles caractéristiques où s'opèrent la conversion électromagnétique depuis le domaine magnétique micrométrique jusqu'au réseau de transport de quelques milliers de kilomètres. La conception d'un système électrique consiste alors à profiter de la plus faible inertie de l'échelle inférieure pour adopter une approche par « champ moyen » [16] qui, pour un dispositif donné, ex-

9 Pour les systèmes actuels qui embarque une part non-négligeable de production solaire photovoltaïque, il convient d'introduire ici la puissance radiative effectivement convertie et injectée dans le réseau. On parle aussi de production fatale. prime la condition de réversibilité (6) à l'échelle considérée en respectant des conditions de consistance entre échelles. Cette approche a été déclinée avec succès pour :

- modéliser les pertes dynamiques dans les matériaux magnétiques doux [17] où la méthode empirique de diffusion retardée n'est pas consistante avec la théorie d'ordre 1 dans laquelle s'exprime l'évolution quasi-statique du champ [18, 19];
- déterminer un critère de qualité de maillage pour le calcul des courants de Foucault dans les conducteurs par la méthode des éléments finis [20] puis proposer une stratégie de maillage adaptatif [21];
- préciser, dans l'approximation des régimes quasi-permanents, les conditions d'établissement des limites quasi-statique-magnétique et électro-quasi-stationnaire usuellement discutées sur les amplitudes respectives des champs électrique et magnétique [22] alors que l'équation (6) suggère de privilégier l'étude du conditionnement du terme de couplage [23] ;
- exhiber (E_{cin} + F) comme « constante du mouvement » énergétique [24] résultante de l'uniformité du temps dans le formalisme lagrangien si le système global évoluait de manière stationnaire [25] ;

valider la pertinence de l'approche thermodynamique dans la clarification de certains problèmes d'électrodynamique basse fréquence.

Conclusion

Cette présentation de l'électromagnétisme « basse fréquence » correspond à celle qu'aurait pu obtenir un esprit « naïf » qui n'aurait connu que la thermodynamique pour expliquer les phénomènes électromagnétiques qu'il aurait observés si les principes avaient été admis bien avant les travaux de Faraday

L'auteur

Vincent Mazauric



rejoint Schneider Electric en 1995 après avoir été successivement chercheur associé à l'Office National

d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA) et au Center for Extreme Materials d'Osaka (Japon). Il est Docteur en Physique du solide de l'Université Paris-Sud (Orsay) et est diplômé en Génie Electrique (Grenoble), Physique théorique et mathématiques pures (Paris).

Il est fortement impliqué dans les questions relatives au développement durable et aux politiques climatiques et énergétiques, notamment comme expert auprès du GIEC et observateur de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques depuis 2006. Il reçoit en 2013 l'Applied **Electromagnetics and Mechanics** Award pour une interprétation thermodynamique des phénomènes électromagnétiques basse quence.

et de Maxwell : l'ensemble des équations de Maxwell aurait alors pu être obtenu selon deux théories du premier ordre jusqu'à admettre leurs combinaisons pour obtenir une théorie du second ordre à l'origine de la propagation (Figure 1-b puis Figure 1-a).

Outre que cette approche aurait permis de coupler plus intimement l'analyse des phénomènes électromagnétiques aux considérations énergétiques au fil des développements de l'ingénierie, elle repose sur la propriété remarquable de réversibilité thermodynamique qui confère au vecteur électrique un rôle central dans la proposition d'un système énergétique soutenable.

Références

- [1] J. D. Jackson, Classical electrodynamics. New York, USA: John Wiley and sons, 1975.
- [2] L. Landau and E. Lifschitz, Théorie des champs vol. 2. Moscow, Russia: Mir, 1970.
- [3] E. Tonti, «On the mathematical structure of a large class of physical theories,» Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti. Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali, vol. 52, pp. 51-56, 1972.
- [4] E. Tonti, «The reason for analogies between physical theories,» Applied Mathematical Modelling, vol. 1, pp. 37-50, 1976.
- [5] G. Russakoff, «A derivation of the macroscopic Maxwell equations,» American Journal of Physics, vol. 38, pp. 1188-1195, 1970.
- [6] A. Bossavit, Electromagnétisme en vue de la modélisation vol. 14. Paris, France: Springer-Verlag, 1993.
- [7] M. Le-Bellac and J.-M. Lévy-Leblond, «Galilean electromagnetism,» Il Nuovo Cimento, vol. 14B, pp. 217-233, 1973.
- [8] F. de Coulon and M. Jufer, Introduction à l'électrotechnique vol. 1. Lausanne, Suisse: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1995.
- [9] C. E. Shannon, «A mathematical theory of communication,» The Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379-423, 1948.
- [10] E. T. Jaynes, «Information theory and statistical mechanics,» Physical Review, vol. 106, pp. 620-630, 1957.

- [11] H. B. Callen, Thermodynamics and an introduction to thermostatistics. New York, USA: John Wiley and sons, 1985.
- [12] L. Landau and E. Lifschitz, Electrodynamique des milieux continus vol. 8. Moscow, Russia: Mir, 1969.
- [13] V. Mazauric, «From thermostatistics to Maxwell's equations: A variational approach of electromagnetism,» IEEE Transactions on Magnetics, vol. 40, pp. 945-948, 2004.
- [14] L. Borel and D. Favrat, Thermodynamique et énergétique: de l'énergie à l'exergie vol. 1. Lausanne, Suisse: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2005.
- [15] P. Hammond, Energy methods in electromagnetism. New York, USA: Clarendon, Oxford University Press, 1981.
- [16] M. Héritier, Physique de la matière condensée: des atomes froids aux supraconducteurs à haute température critique. Les Ulis, France: EDP Sciences, 2013.
- [17] G. Bertotti, «General properties of power losses in soft ferromagnetic materials,» IEEE Transactions on Magnetics, vol. 24, pp. 621-630, 1988.
- [18] V. Mazauric, O. Maloberti, G. Meunier, A. Kedous-Lebouc, O. Geoffroy, and Y. Rebière, «An energy-based model for dynamic hysteresis,» IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, pp. 3766-3768, 2005.
- [19] V. Mazauric, M. Drouineau, and L. Rondot, «Assessing anomalous losses with dynamic hysteresis models,» International

- Journal in Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 33, pp. 95-101, 2010.
- [20] D. Ladas, V. Mazauric, G. Meunier, O. Chadebec, M. Ebene-Ebene, Y. Maréchal, et al., «An energy based approach of electromagnetism applied to adaptative meshing and error criteria,» IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, pp. 1246-1249, 2008.
- [21] D. Dupuy, D. Pedreira, D. Verbeke, V. Leconte, P. Wendling, L. Rondot, et al., «A magnetodynamic error criterion and an adaptive meshing strategy for eddy current evaluation,» IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, p. 7402504, 2016.
- [22] T. Steinmetz, S. Kurz, and M. Clemens, «Domains of validity of quasistatic and quasistationary field approximations,» COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 30, pp. 1237-1247, 2011.
- [23] V. Mazauric, N. Addar, L. Rondot, P. Wendling, and M. Barrault, «From Galilean covariance to Maxwell equations: Back to the Quasi-Static regimes,» IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, p. 7200804, 2014.
- [24] X. Li, N. Maïzi, and V. Mazauric, «A lattice-based representation of power systems dedicated to synchronism analysis,» International Journal in Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 59, pp. 1049-1056, 2019.
- [25] L. Landau and E. Lifschitz, Mécanique vol. 1. Moscow, Russia: Mir, 1981.

Résumé

Après avoir rappelé le formalisme axiomatique des lois de l'électromagnétisme, on en propose une interprétation thermodynamique au premier ordre en temps. Alors que les lois statiques traduisent l'unicité de la fonction d'état et les lois de comportement de la convexité du potentiel dont elles découlent, la loi de l'induction de Faraday exprime une tendance réversible globale du système électrique. Une approche par champ moyen permet alors de clarifier certains résultats récents.

Abstract

After recalling the axiomatic formalism of electromagnetic theory, a time-first-order thermodynamic interpretation is given. While behavior laws reflect the convexity of the potential from which static laws are derived, Faraday's law of induction expresses a reversible global trend of the electrical system. A mean-field approach provides insights to clarify some recent results.

Proposition thermodynamique vers un monde plus électrique

2 – Des contraintes de l'exploitation aux externalités

Vincent Mazauric

Schneider Electric, Grenoble **Sergio Ciliberto**

Ecole Normale Supérieure, Lyon

Introduction

Hérité du développement de l'énergie électrique, l'exploitation en courant alternatif (AC) s'est imposée progressivement pour conduire à l'architecture des réseaux centralisés que l'on connait aujourd'hui. Les systèmes électriques tendent à s'hybrider en raison de la pénétration de productions et d'usages exploitant intrinsèquement le courant continu (DC): production photovoltaïque (PV), véhicule électrique, éclairage à LED, technologies de l'information et de la communication (TIC), électrolyse, etc. Il est alors intéressant d'examiner ce que ces différents modes d'exploitation recèlent en termes thermodynamiques 1, que cela concerne les aspects de conversion d'énergie ou de moyens d'acquisition d'information pertinents pour piloter le système, ou plutôt

Conduite des systèmes électriques

Spatialement étendu et thermodynamiquement ouvert, le système électrique est un lieu ³ :

- de conversion entre puissances mécanique $P_{\mbox{\tiny mec}}$ et électrique $P_{\mbox{\tiny elec}}$;
- d'accumulation d'énergie cinétique $E_{\mbox{\tiny cin'}}$ essentiellement embarquée par les rotors des machines tournantes, et d'énergie libre électromagnétique F;
- de dégradation de l'énergie en chaleur se manifestant par la puissance Joule $P_{\mbox{\scriptsize Joule}}$;

qui subit en permanence des fluctuations d'exploitation localisées dont l'acquisition et le traitement de l'information, la prise de décision et les actions correctives associées forment une durée irréductible τ dont dispose le responsable d'équilibre pour rétablir l'adéquation entre la génération et la consommation 4 . En considérant la production fatale $P_{\rm elec}$, une condition nécessaire de satisfaction de la demande sur l'horizon glissant τ s'exprime par intégration de l'équation de Poynting (I-7) à l'échelle du système entier :

$$\int_{t}^{t+\tau} \left(P_{\text{mec}} - P_{\text{Joule}} + P_{\text{elec}} \right) dt \le \left(E_{\text{cin}} + F \right) (t)$$
 (1)

et montre le rôle tout à fait décisif de la « constante du mouvement » énergétique (E_{cin} +F) pour rétablir la stabilité du système. En d'autres termes, la durée τ dont dispose le régulateur pour rétablir l'équilibre sera d'autant plus grande que les déséquilibres admissibles seront petits et que les contributions à la « constante du mouvement » seront importantes : l'énergie cinétique et l'énergie libre électromagnétique agissent donc comme une « réserve dynamique » mutualisée à l'échelle du réseau dont, en fait, on n'utilise qu'une faible partie pour rester dans un domaine d'analyse linéaire :

la coexistence de ces deux aspects au sein du même réseau dans la mesure où le système électrique doit non seulement satisfaire une demande sociale, associée abusivement à sa puissance active, mais également trouver en luimême l'énergie nécessaire à son exploitation et à sa résilience ².

² Dans une classification beaucoup plus rigoureuse, la puissance réactive est échangée avec le champ électromagnétique alors que la puissance active est échangée avec la matière : l'effet Joule et la puissance mécanique contribuent donc à la puissance active si bien que cette classification n'est pas compatible avec celle qu'opère la thermodynamique entre énergies noble et dégradée. On remarque également que la puissance électrique définie par l'équation de Poynting (l-7) n'a pas de « genre ».

³ La numérotation (I-x) renvoie à l'équation (x) de la contribution précédente : I – Des principes thermodynamiques aux équations de Maxwell.

¹ On ne s'attardera pas sur les avantages technologiques qui ont conduit à la généralisation du courant alternatif : protection facilitée par coupure au « zéro » de courant, possibilité d'élever/abaisser la tension par usage de transformateurs, grandeurs composées constantes en régime multi-phasé équilibré limitant le vieillissement des machines, absence d'arc de commutation aux collecteurs des machines tournantes... [1].

⁴ L'onde de tension informant d'une fluctuation d'exploitation se propage à la vitesse de la lumière : l'information est donc partagée à l'échelle de la plaque européenne au mieux après 10ms. On doit doubler ce temps pour décentraliser les décisions d'équilibre : l'existence d'une durée irréductible s'oppose à l'idée d'un système électrique pilotable en « temps réel ».

- la dérive dans le temps de la « constante du mouvement » permet un partage d'information « naturel » sur le déséquilibre ;
 - l'écart au statisme fixe la contribution de chaque nœud d'injection/soutirage au rétablissement d'un équilibre.

La discrimination spatiale des limites quasi-statique magnétique et électro-quasi-stationnaire [2] permet de préciser les conditions de stabilisation des systèmes électriques dont on pourra cumuler les effets grâce à des interfaces d'électronique de puissance.

Bus de puissance DC

Une fois la relaxation électrique opérée selon l'équation exergétique (I-6), l'équation de Poynting (I-7) se simplifie considérablement pour les composants usuels contribuant à l'établissement de la limite électro-quasi-stationnaire [2], essentiellement des capacités et des batteries électrochimiques connectées au bus DC contribuant à l'énergie libre électrostatique F_{elec}:

$$P_{\text{elec}}(\Omega_i) - P_{\text{Joule}}(\Omega_i) = \frac{dF_{\text{elec}}(\Omega_i)}{dt}$$
 (2)

Ainsi, pour un bus de puissance équipotentiel $\Omega_{i'}$ les variations d'énergie libre électrostatique compensent le déséquilibre en puissance. Réciproquement :

- une dérive dans le temps de la tension du bus informe que l'équilibre entre génération et consommation n'est pas réalisé;
- pour un déséquilibre faible devant l'énergie capacitive, l'écart au statisme par rapport à la tension de référence V_0 procure la correction à opérer pour rétablir l'équilibre entre la génération et la consommation : c'est le réglage en tension opéré par les sources DC pilotables.

Réseau AC

Par nature inductif, un réseau AC est opéré autour d'une fréquence industrielle de référence – $\dot{\theta}_0/2\pi$ =50Hz en Europe – pouvant présenter une légère dérive et une

faible distorsion spatiale autour de cette valeur, respectivement en raison de la réponse globale du réseau à une fluctuation d'exploitation et de sa localisation initiale. Plus précisément, la limite quasi-statique-magnétique [2] résultant de la modification de l'état stationnaire du système électrique s'analyse selon une échelle de temps croissante :

- gouvernée par l'équation exergétique (I-6), la relaxation électrique s'opère usuellement sur quelques ms, quelle que soit la nature de la charge, si bien que le régime harmonique forcé est restauré en moins d'une période. Ainsi,
- autour de la fréquence $\dot{\theta}_i/2\pi$ constatée au nœud i, (la moyenne temporelle de) la contribution par phase à l'énergie libre magnétique du réseau 5 d'inductances L_{ij} s'exprime simplement à partir de la puissance réactive Q duréseau de réactance $X_{ij} = L_{ij} \dot{\theta}_i$ soumis au plan de tension U, en l'absence de contribution capacitive significative [3] :

$$F_{\text{mag}} = \sum_{\langle ij \rangle} \frac{Q_{ij}}{2\dot{\theta}_i} = \sum_{\langle ij \rangle} \frac{\left| U_i - U_j \right|^2}{2\dot{\theta}_i X_{ij}} = \sum_{\langle ij \rangle} \frac{1}{2\dot{\theta}_i X_{ij}} \left(|U_i|^2 + |U_j|^2 - 2|U_i||U_j|\cos(\theta_i - \theta_j) \right)$$
(3)

de sorte que :

• l'évolution « passe-bas » de la fréquence localement observée autour du nœud *i* est régie par la restriction de l'équation de Poynting (I-7) aux contributions magnétiques :

$$\underbrace{\frac{P_{\text{mec}}(\Omega_i) + P_{\text{elec}}(\Omega_i) - P_{\text{Joule}}(\Omega_i)}{\Delta P(\Omega_i)} - \sum_j \frac{3|U_i||U_j|}{X_{ij}} \sin(\theta_i - \theta_j)}_{\text{d } t}$$

$$= \frac{d E_{\text{cin}}(\Omega_i)}{d t} \tag{4}$$

Ainsi une variation d'énergie cinétique constatée au nœud *i* peut provenir d'un déséquilibre entre l'offre et la demande sur

 Ω_{i} ou par la modification des angles électriques θ_{i} connexes au nœud i.

Le foisonnement s'obtient en effectuant une sommation sur l'ensemble des nœuds. Pour de faibles déviations de la fréquence, l'évolution du système électrique est gouvernée par un Hamiltonien dont l'analyse de la partie potentielle :

$$\mathcal{E}(\{\theta_i\}) = \sum_{\langle ij \rangle} \frac{3|\cup_i||\cup_j|}{\chi_{ij}\dot{\theta}} (1 - \cos(\theta_i - \theta_j)) - \sum_i \frac{\Delta P(\Omega_i)}{\dot{\theta}} \cdot \theta_i$$
 (5)

justifie l'existence d'un régime stationnaire. En effet :

- le premier terme décrit un modèle X-Y sur un réseau bidimensionnel [4] : son minimum correspond à l'alignement de l'ensemble des angles électriques. Son analyse ⁶ montre qu'une « phase de synchronisme » où tous les rotors des machines tournent à la même vitesse (électrique) est possible. Néanmoins,
- le second terme agit comme une « dérive » différentiée selon les nœuds qui tend à détruire la phase de synchronisme.

Qualitativement l'existence d'une « phase de synchronisme » est favorisée par un plan de tension élevé, une fréquence basse pour limiter les réactances et favoriser les couplages, et une connectivité importante, idéalement la « plaque de cuivre ». Sous cette hypothèse, un déséquilibre entre production et consommation est compensé par une variation d'énergie cinétique :

$$\frac{\mathrm{d}\,\mathrm{E}_{\mathrm{cin}}}{\mathrm{d}\,t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\,t} \left(\sum_{i} \frac{1}{2} \frac{\mathrm{J}_{i}}{\mathrm{p}_{i}^{2}} \theta_{i}^{2} \right) \cong \left(\dot{\theta}_{0} \sum_{i} \frac{\mathrm{J}_{i}}{\mathrm{p}_{i}^{2}} \right) \frac{\mathrm{d}\dot{\theta}}{\mathrm{d}\,t} \tag{6}$$

⁵ Pour cette description idéalisée et comme c'est l'usage, on considère que les angles internes des machines sont fixés par leurs courants d'excitation, le plan de tension U et la fréquence de sorte que la contribution des machines à l'énergie libre globale est une constante qui n'intervient pas dans (4).

⁶ Dans le cas d'un réseau infini de dimension D, périodique dont les couplages sont uniformes, le modèle de spins bidimensionnels, ici réalisé par les rotors des machines, constitue le cas marginal entre le modèle d'Ising pour lequel existe un ordre à longue distance pour D≥2 [5] et le modèle d'Heisenberg pour lequel aucun ordre à longue distance n'est possible pour D<3 [6]. Ce cas marginal n'exhibe pas d'ordre à longue distance en dessous de la transition de Korterlitz-Thouless mais seulement des corrélations lentement décroissantes au sein d'une phase topologique [7].

- dont l'inertie considérable procurée par les moments 7 agrégés spatialement connectés au réseau garantit une évolution linéaire de la fréquence... et du temps au responsable d'équilibre! Réciproquement :
 - une dérive dans le temps de la fréquence informe que l'équilibre entre génération et consommation n'est pas réalisé;
 - l'écart au statisme par rapport à la fréquence de référence $\dot{\theta_0}/2\pi$ procure la correction à opérer pour rétablir l'équilibre entre la génération et la consommation : c'est le réglage primaire en fréquence 8 .

Une fois précisées les conditions nécessaires de stabilité, l'évolution dynamique du système électrique selon l'ensemble d'équations (4) suit un modèle de Kuramoto du second ordre [8] dont les conditions de stabilité sont étudiées précisément dans [9].

Ordres de grandeur et comparaison

Pour fixer les idées, la consommation du système européen était en 2017 de 3329 TWh correpondant à une puissance moyenne de 380 GW. La pointe de consommation fut de 542 GW pour une capacité installée de 1060 GW [10]. L'étendue spatiale de ce réseau fixe « l'aveuglement » du responsable d'équilibre à 20 ms : le système doit donc disposer de 20 kJ d'énergie libre électromagnétique stockée pour compenser une fluctuation de 1 MVA en maintenant son état électromagnétique.

Quelques ordres de grandeur sont alors utiles pour estimer la constante du mouvement énergétique que le système électrique peut raisonnablement « opposer » à une fluctuation de charge [11] :

- le champ disruptif de l'air $(3\cdot 10^{+6} \text{ V/m})$ limite l'énergie spécifique électrostatique à : $4\cdot 10^{+1} \text{ J/m}^3$;
- la saturation du fer limite l'induction autour de 1 T pour la plupart des usages industriels de sorte que l'énergie spécifique magnétique maximale envisageable est de $4\cdot10^{+5}$ J/m³;
- un cylindre d'1 m³ de fer (densité 8 g/cm³) et d'1 m de longueur tournant à 50 Hz embarque une énergie cinétique de : $6\cdot10^{+7}$ J/m³.

Ainsi:

- l'énergie magnétique dont il faut disposer localement pour éviter la perte de synchronisme est qualitativement donnée en équilibrant les deux termes de (5), soit approximativement 3 kJ par MVA de fluctuation admissible, correspondant à un volume d'air de 23 dm³/MVA porté à 1 T par des pièces polaires magnétiques. Compte-tenu du nombre de points d'injection et de soutirage sur les réseaux – typiquement quelques centaines –, cette contrainte de « densité » d'énergie magnétique est la plus dimensionnante.
- pour la géométrie décrite, le cylindre de fer présente une inertie d'environ 1mn s'il doit libérer son énergie cinétique sous une puissance de 1 MVA. Pour rester dans un régime linéaire de ±0,5 Hz autour de 50 Hz, l'inertie disponible est ramenée à 1 s.

Si la perte d'un groupe de production nucléaire d'1GW est envisageable [1] et pour une durée de recours à la réserve primaire de l'ordre de 10 secondes, l'énergie cinétique doit nécessairement être massifiée de 4 ordres de grandeurs à répartir localement ou globalement, respectivement en densifiant la masse embarquée des machines ou en favorisant l'interconnexion entre machines tournantes. Néanmoins, la tendance actuelle de démantèlement d'unités conventionnelles limite la possibilité d'agrégation ⁹ selon (6) et conduit à exiger une plus grande agilité du responsable d'équilibre donc à renforcer l'infrastructure numérique à laquelle le système énergétique est adossé.

Compte-tenu des ratios d'énergies par unité de volume et des enjeux de puissance à satisfaire par l'exploitation, un bus de puissance DC sera envisageable pour des réseaux très localisés (par exemple de distribution terminale), fortement interfacés par des convertisseurs AC/DC s'il doit subir des fluctuations de puissance importantes et un pilotage très réactif.

Des scénarios d'électrification décarbonée aux arbitrages technologiques

Les deux contributions à la « constante du mouvement » énergétique apparaissent pilotables séparément :

- l'énergie libre, localement fixée par le plan de tension d'après (3), garantit le synchronisme et permet l'agrégation spatiale selon (6) pour maximiser :
- l'énergie cinétique des unités connectées au réseau à même de faire face aux fluctuations de charge avant le rétablissement d'un équilibre offre-demande contrôlé par l'annulation de la dérive de la fréquence électrique autour de la fréquence de référence;

et permettent une endogénéisation dans des exercices de prospective tech-

⁷ Eventuellement réduits par le nombre de paires de pôles \mathbf{p}_i de la machine i.

⁸ Alors que la réserve primaire est destinée à rétablir l'équilibre entre génération et consommation, les réglages secondaire et tertiaire permettent de retrouver la fréquence de référence, de reconstituer les réserves puis de satisfaire un optimum économique [1].

⁹ mais également les risques de défaillance qui vont avec...

- nologique consistant à minimiser le coût total actualisé sur un horizon temporel discrétisé - typiquement 2050 - sous contraintes de décarbonation [12]. Plus précisément, imposer l'énergie cinétique sur chaque intervalle de temps de la modélisation prospective opère une réconciliation temporelle entre une contrainte opérationnelle (de l'ordre de quelques secondes) et l'horizon prospectif (typiquement 50 ans) et aboutit à un problème MILP 10 [13]. On vérifie alors a posteriori que le réseau dispose d'une connectivité suffisante entre points d'injection et de soutirage pour que les congestions ne viennent pas compromettre le synchronisme quel que soit l'intervalle de temps [9] : on peut ainsi agir sur les renforcements de réseau à opérer ou à l'inverse sur le positionnement des nouvelles capacités. Ainsi:
 - l'étude de l'autonomie énergétique de l'île de la Réunion à l'horizon 2030 a montré qu'un fort taux de sources renouvelables variables était envisageable sans compromettre la fiabilité de l'exploitation [14]. Une politique de flexibilités de la demande permet de baisser la capacité à installer d'environ 6% [15] alors que le stockage dynamique compense en partie la perte d'énergie cinétique [16]. Enfin le réseau doit être renforcé pour garantir le synchronisme en saison hivernale où le taux de congestion augmente par l'abandon des unités conventionnelles carbonées.
 - effectué dans un contexte de baisse programmée à 50 % de la génération d'origine nucléaire (LTECV ¹¹), l'analyse du cas français a montré que des scénarios incluant de larges proportions de production de sources renouvelables variables ne satisfaisaient pas naturellement la condition sur l'énergie cinétique et devaient être contraints [17]. La part optimale de production renouvelable

variable qui ne remet pas en cause les conditions techniques d'exploitation est alors de 65 % ce qui signifie qu'au-de-là, il y aurait une sous-utilisation de ces capacités ou une exploitation à risque si ces capacités restaient prioritaires. Ce chiffre est beaucoup plus élevé que la limite légale retenue pour exploiter les systèmes insulaires [18].

Une analyse spatiale a également été menée et a montré qu'un système décentralisé, en réduisant le taux de congestion, favorisait le synchronisme alors qu'un système centralisé favorisait l'inertie [19]. Si l'autonomie énergétique des territoires n'était pleinement acquise que pour 4 régions sur 13, les autres devant « importer » de l'énergie cinétique, la politique d'autonomisation conduit globalement à une surcapacité et une surproduction. Une étude menée indépendamment a montré la cohérence des résultats obtenus par minimisation du coût total actualisé avec une approche statistique fondée sur la satisfaction de la LOLE 12 [19].

• enfin un exercice mondial de migration des usages vers l'électricité a été réalisé et a montré que les contraintes climatiques ne pouvaient pas être satisfaites à l'horizon 2050 sans la mobilisation et le déploiement de toutes les technologies décarbonées et décarbonables, notamment la production d'origine nucléaire et la capture et la séquestration du CO₂. Dans cet exercice, l'Inde, les USA et, dans une moindre mesure, la Chine apparaissent fragiles du point de vue des contraintes opérationnelles de l'exploitation, compte-tenu notamment de leurs bases industrielles électro-intensives et de la forte pénétration des sources renouvelables variables. Enfin le secteur des transports et celui des équipements résidentiels et tertiaires apparaissent comme les « gagnants »

de cette migration vers une électricité décarbonée [21].

Néanmoins, les évolutions actuelles privilégient des systèmes disposant d'un contrôle plus agile pour compenser une moindre inertie en raison du démantèlement des unités carbonées conventionnelles et de l'intégration de sources variables dispersées ne contribuant pas (ou peu) à l'énergie cinétique. La question de l'équilibre entre les coûts d'investissement et d'exploitation respectifs de l'infrastructure numérique et énergétique est alors posée.

Disperser l'énergie, massifier l'information?

Les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) dans les systèmes énergétiques sont amenées à effectuer ¹³:

- des opérations de contrôle :
 - en fournissant des stratégies d'efficacité énergétique, incluant la gestion des flexibilités, respectant la tension entre l'offre et la demande ;
 - en maintenant la stabilité du système dans un contexte de diminution tendancielle de l'inertie du système énergétique ;
 - en synchronisant l'ensemble des actifs pour garantir au système la plus grande inertie possible dans un contexte où le productible renouvelable introduirait une moindre qualité harmonique du signal de puissance sans interfaces d'électronique de puissance;

¹⁰ Mixed Integer Linear Programming.

¹¹ Loi de Transition Energétique et de Croissance Verte (2015).

¹² La « Loss of Load Expectation » correspond au nombre d'heures prévu pendant lesquelles la charge ne pourra pas être couverte par l'ensemble des moyens de production à disposition du réseau électrique.

¹³ On s'intéresse ici non pas à la numérisation comme demande sociale — la société digitale — , mais au rôle de la numérisation dans les opérations du système énergétique lui-même dans un contexte de migration vers l'électricité et de pénétration des énergies renouvelables intermittentes. La question est ainsi de définir le lien entre énergie et numérisation du point de vue thermodynamique.

- en gérant les actifs fortement dispersés et les charges au comportement versatile dans le cadre d'une migration générale de l'énergie vers l'électricité et du déploiement des énergies renouvelables intermittentes;
 - en garantissant les transactions énergétiques (blockchains) et plus généralement la cybersécurité de l'infrastructure globale.

• de la prévision :

- en fournissant une météorologie de plus en plus précise pour atténuer l'effet de l'intermittence dans l'opération du système ;
- en permettant une stratégie de maintenance prédictive nécessaire pour gérer des actifs énergétiques plus fortement dispersés.

Il est alors utile de considérer le lien entre énergie et information, pour la première fois remarqué dans le paradoxe du Démon de Maxwell (1867). La levée de ce paradoxe a permis de clarifier le rôle thermodynamique des technologies de l'information et d'établir l'équivalence entre information manquante et entropie [22]. En effet, le rôle des technologies de l'information est d'accroitre la connaissance dont on dispose sur un système donné. D'un point de vue thermodynamique, cette ambition contrarie l'évolution naturelle d'un système isolé, si bien que, pour respecter le second principe de la thermodynamique, l'acquisition d'information réalisée par ce traitement est forcément inférieure à la création d'entropie réalisée par ailleurs par la dégradation d'énergie noble en chaleur.

Le processeur est la machine thermodynamique qui réalise cette acquisition : pour accroître la connaissance d'un système donné ou de manière équivalente baisser son entropie, elle consomme de l'énergie noble (d'ori-

Les auteurs

Vincent Mazauric rejoint Schnei-



der Electric en 1995 après avoir été successivement chercheur associé à l'Office National d'Etudes et de Re-

cherches Aérospatiales (ONERA) et au Center for Extreme Materials d'Osaka (Japon). Il est Docteur en Physique du solide de l'Université Paris-Sud (Orsay) et est diplômé en Génie Electrique (Grenoble), Physique théorique et mathématiques pures (Paris).

Il est fortement impliqué dans les questions relatives au développement durable et aux politiques climatiques et énergétiques, notamment comme expert auprès du GIEC et observateur de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques depuis 2006. Il reçoit en 2013 l'Applied Electromagnetics and Mechanics Award pour une interprétation thermodynamique des phénomènes électromagnétiques basse fréquence.

Sergio Ciliberto est Directeur de Re-



cherche Émérite au Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon. Il a étudié à l'Université de Florence en Italie et il a été Directeur de

Recherche au CNRS de 1991 à 2020. Il a travaillé comme chercheur invité dans plusieurs laboratoires en France et l'étranger. Physicien expérimentateur, il s'est intéressé à plusieurs sujets de recherche comme l'hydrodynamique, la science des matériaux, la dynamique chaotique et dernièrement la thermodynamique stochastique et la connexion entre thermodynamique et information. Il a obtenu en 2010 un ERC Advanced Grant, en 2018 un prix de l'Académie des Sciences et en 2019 le prix de Physique Statistique et Physique non-Linéaire de l'European Physical Society. Il est auteur de 180 articles scientifiques. Il a été Directeur de laboratoire et vice-président en charge de la recherche à l'ENS de Lvon, Il a été membre de plusieurs comités nationaux (CNRS, AERES) et internationaux (ERC, Minerva Foundation).

gine électrique), et la dissipe dans un thermostat en conservant globalement les transferts d'énergie, selon le premier principe de la thermodynamique. Sa machine duale étant le moteur de Szillard [23], la classification thermodynamique suggère de voir le processeur comme une machine frigorifique dont l'efficacité est définie par un coefficient de performance (CoP) pouvant varier de 0 à l'infini. Ce dernier est utile pour calculer le service thermodynamique rendu par la numérisation.

D'une manière générale, les machines actuelles, inspirées de la machine de Turing, sont basées sur le principe d'effacement de l'information acquise exprimée par le principe de Landauer [24-28], afin de disposer du processeur pour le calcul élémentaire suivant. Cette « fermeture » du cycle de fonctionnement du processeur permet d'évaluer le coefficient de performance d'une technologie donnée en comparant la valeur de cette information à l'énergie d'acquisition qui lui a été allouée par la polarisation des circuits d'électronique logique [29] :

- actuellement, le coefficient de performance atteint par la technologie CMOS pour réaliser une mémoire tourne autour de 10⁻⁵.
- avec l'électronique de spin, ce coefficient de performance gagnerait 2 voire 3 ordres de grandeur.

- Pour revenir au sujet de la numérisation de l'énergie, il existe deux cas de figures :
 - l'efficacité énergétique active en « aval compteur » où le process de demande est optimisé grâce à des moyens de contrôle mis en œuvre sur les variables d'état intensives. Il est alors possible d'optimiser tant que le flux d'énergie utile reste supérieur à celui consommé par les moyens de contrôle : ce levier constitue un gisement considérable dans les politiques énergétiques actuelles.
 - la numérisation de l'infrastructure énergétique où une partie de l'énergie finale est réinjectée dans les moyens de contrôle pour rendre le système opérable en procurant une qualité thermodynamique à l'énergie primaire pour une disponibilité suffisante de l'énergie finale. La soutenabilité de ce cas de figure n'est pas assurée compte tenu des aspects extensifs à intégrer et du faible CoP des technologies numériques actuelles.

Finalement, le second principe de la thermodynamique impose que les transitions énergétique et numérique s'opèrent ensemble, les gains de l'une relâchant la contrainte temporelle sur l'autre. Cela plaide pour des exercices de planification joints où la tension sur les matériaux doit également être considérée.

Conclusion

Nous nous sommes attachés à montrer comment la thermodynamique irriguait l'ensemble du système électrique :

- en interprétant la loi de Faraday comme la conséquence locale d'une tendance globale vers la réversibilité;
- en exhibant la « constante du mouvement » énergétique dont découle la stabilité du système ;
- en analysant le synchronisme comme une phase susceptible de se désorganiser ;
- en affirmant le lien entre opération de contrôle et énergie, nécessitant d'envisager simultanément les transitions énergétique et numérique.

Nous pensons que cette approche est adaptée à la recherche d'un système énergétique soutenable où la matérialité de l'infrastructure et l'énergie nécessaire au contrôle de sa stabilité auront pu être prises en compte.

Nous espérons également avoir montré que la thermodynamique – et ses deux principes – procure un cadre de raisonnement sur les possibles, préalable à la consolidation d'une description détaillée qui, prise isolément, fait perdre de vue la motivation initiale dans une fuite en avant technologique.

Les bilans, voire les politiques, énergétiques accordent une place prépondérante au premier principe de la thermodynamique : qu'il s'agisse de son interprétation économique adaptant l'offre et la demande, ou de la sous-estimation des externalités (ici la matérialité de l'infrastructure et la consommation des technologies de contrôle). Le second principe rattrape donc toujours la réalité que l'on a cru servir et participe ainsi à un « effet rebond » proscrit par l'enjeu climatique. Cette contribution visait également à restaurer la réalité entropique du vecteur électrique pour comprendre comment la propriété (faible) de réversibilité est souvent contrariée par les performances escomptées.

Résumé

Les conditions d'exploitation des systèmes électriques sont expliquées à partir de l'écriture du second principe de la thermodynamique. Les cas DC et AC sont analysés du point de vue de la stabilité, en maintenant respectivement l'équipotentialité du bus de puissance et la phase de synchronisme sous fluctuations de puissance. Quelques exercices de prospectives (Réunion, France et Monde) sont décrits pour montrer l'importance des contraintes opérationnelles. Pour que les transformations observées des systèmes électriques conduisent aux objectifs de soutenabilité recherchés, il apparait nécessaire d'endogénéiser la matérialité de l'infrastructure ainsi que l'énergie nécessaire à sa fabrication et son contrôle.

Abstract

Power management is investigated from the existence of a "constant of motion" derived from the second principle of thermodynamics. Both DC and AC types are considered from the stability viewpoint and orders of magnitude are given: While DC case relies on equipotentiality of the DC bus under power fluctuations, the AC case leverages a huge inertia as long as a so-called "phase of synchronism" is maintained. Some long-term planning studies are then reviewed within La Réunion, France and global exercises to highlight the role of the operational constraints. To align the already initiated transformations of the power system with sustainability objectives, it appears relevant to endogenize in planning exercises the materiality of the infrastructure and the extra-energies for its manufacturing and for processing its control.

· · · Références

- [1] M. Aguet and J.-J. Morf, Energie Electrique vol. 12. Lausanne, Suisse: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1987.
- [2] V. Mazauric, N. Addar, L. Rondot, P. Wendling, and M. Barrault, «From Galilean covariance to Maxwell equations: Back to the Quasi-Static regimes,» IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, p. 7200804, 2014.
- [3] F. Guardiol, Electromagnétisme vol. 3. Lausanne, Suisse: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1996.
- [4] D. D. Betts, «X-Y Model.» in: Phase Transitions and Critical Phenomena, vol. 3, ed. C. Domb and M.S. Green, New York, USA: Academic Press, 1972, pp. 569-652.
- [5] L. Onsager, «Crystal Statistics. I. A Two-Dimensional Model with an Order-Disorder Transition,» Physical Review, vol. 65, pp. 117-149, 1944.
- [6] N. D. Mermin and H. Wagner, «Absence of Ferromagnetism or Antiferromagnetism in One- or Two-Dimensional Isotropic Heisenberg Models,» Physical Review Letters, vol. 17, pp. 1133-1136, 1966.
- [7] J. M. Kosterlitz, «Nobel Lecture: Topological defects and phase transitions,» Reviews of Modern Physics, vol. 89, p. 040501, 2017.
- [8] Y. Kuramoto, «Self-entrainment of a poulation of coupled non-linear oscillators,» in International symposium on mathematical problems in theoretical physics, pp. 420-422.
- [9] F. Dörfler and F. Bullo, «Synchronization in complex networks of phase oscillators: A survey,» Automatica, vol. 50, pp. 1539-1564, 2014.
- [10] A. Anagnostou, S. Giguet, Z. Fučík, T. Jeźyński, R. Kok, N. Kouveliotis, et al., «Electricity in Europe 2017: Synthetic overview of electric system consumption, generation and exchanges in 34 European countries,» European Network of Transmission System Operators for Electricity, Brussels, BelgiumDecember 2018.
- [11] M. Jufer, Electromécanique vol. 9. Lausanne, Suisse: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1998.
- [12] R. Loulou and M. Labriet, «ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model part i: Model structure,» Computational Management Science, vol. 5, pp. 7-40, 2008.
- [13] S. Gass, Linear Programming: Methods and Applications: McGraw-Hill, 1975.
- [14] N. Maïzi, V. Mazauric, E. Assoumou, S. Bouckaert, V. Krakowski, X. Li, et al., «Maximizing intermittency in 100% renewable and reliable power systems: A holistic approach applied to Reunion Island in 2030,» Applied Energy, vol. 227, pp. 332-341, 2017.
- [15] S. Bouckaert, V. Mazauric, and N. Maïzi, «Expanding renewable energy by implementing Demand Response,» Energy Procedia, vol. 61, pp. 1844-1847, 2014.
- [16] S. Bouckaert, P. Wang, V. Mazauric, and N. Maïzi, «Expanding renewable energy by implementing Dynamic sup-

- port through storage technologies,» Energy Procedia, vol. 61, pp. 2000-2003, 2014.
- [17] G.-S. Sokhna, V. Krakowski, E. Assoumou, N. Maïzi, and V. Mazauric, «Embedding power system's reliability within a long-term Energy System Optimization Model: Linking high renewable energy integration and future grid stability for France by 2050,» Applied Energy, vol. 257, p. 114037, 2020. [18] F. Fesquet, P. Juston, and I. Garzulino, «Impact and limitation of wind power separation in an island power system.)
- tation of wind power generation in an island power system,» in IEEE Power Tech Conference, Bologna, Italy, 2003, p. 7. [19] R. Cluet, N. Maïzi, and V. Mazauric, «From centralized to decentralized power system: A space analysis for France»
- decentralized power system: A space-analysis for France,» International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 64, pp. 73–78, 2020.
- [20] Y. Alimou, N. Maïzi, J.-Y. Bourmaud, and M. Li, «Assess-sing the security of electricity supply through multi-scale modeling: The TIMES-ANTARES linking approach,» Applied Energy, vol. 279, p. 115717, 2020.
- [21] M. Mobir, S. Sélosse, N. Maïzi, A. Samperio, and V. Mazauric, «Feasibility of an « All Electric » energy system: A prospective study to 2050,» https://www.modelisation-prospective.org/wp-content/uploads/2022/11/WP_2022_01_31_feasability_100ELEC_2022-1.pdf.
- [22] L. Brillouin, Science and information theory. New York, USA: Academic Press, 1956.
- [23] L. Szillard, «Über die entropyverminderung in einem thermodynamischen system bei eingriffen intelligenter wesen,» Zeitschrift für Physik, vol. 53, pp. 840-856, 1929.
- [24] R. Landauer, «Irreversibility and heat generation in the computing process,» IBM Journal of Research and Development, vol. 5, pp. 261-269 1961.
- [25] A. Berut, A. Arakelyan, A. Petrosyan, S. Ciliberto, R. Dillenschneider, and E. Lutz, «Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics,» Nature, vol. 483, pp. 187-192, 2012.
- [26] E. Lutz and S. Ciliberto, «Information: From Maxwell's demon to Landauer's eraser,» Physics Today, vol. 68, pp. 30-35, 2015.
- [27] A. Bérut, A. Petrosyan, and S. Ciliberto, «Information and thermodynamics: Experimental verification of Landauer's erasure priciple,» Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, p. P06015, 2015.
- [28] S. Dago, J. Pereda, N. Barros, S. Ciliberto, and L. Bellon, «Information and thermodynamics: Fast and precise approach to Landauer's bound in an underdamped micromechanical oscillator,» Physical Review Letters, vol. 126, p. 17061, 2021.
- [29] V. K. Joshi, «Spintronics: a contemporary review of emerging electronics devices,» Engineering Science and Technology, an International Journal, vol. 19, pp. 1503-1513, 2016.

Vers des technologies quantiques responsables

Alexia Auffèves

Directrice de recherche CNRS International Research Laboratory, MajuLab (Singapour)

Olivier Ezratty

Consultant et auteur

Robert Whitney

Chargé de recherche CNRS, LPMMC (Grenoble)

Les progrès des technologies quantiques laissent entrevoir la réalisation de calculateurs quantiques capables d'outrepasser largement les performances des calculateurs classiques dont la puissance de calcul arrive à saturation. Dans une démarche écologique originale, les auteurs se penchent sur la question cruciale de l'empreinte numérique de ces futurs calculateurs quantiques qui, en plus d'un avantage computationnel avéré, pourraient bénéficier d'un « avantage énergétique quantique ». La « Quantum Energy Initiative » (QEI) se propose de fédérer à l'échelle internationale les équipes de recherche fondamentale et les entreprises du secteur des technologies quantiques préoccupées par les aspects énergétiques de ces futurs développements.

L'empreinte énergétique du numérique

Pour comprendre l'approche que nous préconisons, l'exemple de l'empreinte énergétique du numérique des serveurs est révélateur. L'efficacité énergétique de ces systèmes est le ratio d'une performance sur une consommation énergétique. Celle des serveurs peut s'exprimer ainsi en FLOPS/W, les FLOPS exprimant le nombre d'opérations en virgule flottante par seconde. Depuis la naissance de l'informatique, cette efficacité a doublé tous les 18 mois. C'est la loi de Koomey, avec un record actuel pour les supercalculateurs de 52 GFLOPS/W [1].

Paradoxalement, ces progrès fulgurants n'ont pas empêché l'explosion de la consommation énergétique mondiale pour alimenter les technologies numériques. Celles-ci consomment maintenant 11% de l'électricité dans le monde, les centres de calcul représentant le quart de cette empreinte énergétique. Elle augmente au gré des usages, notamment liés à l'apprentissage machine. L'augmentation de la consommation affecte aussi les matières premières du fait de l'obsolescence rapide des terminaux, des serveurs et des systèmes de stockage dans les centres de calcul.

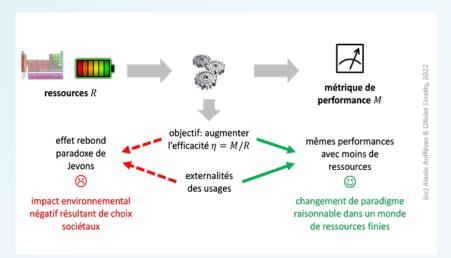
Ces phénomènes ne sont qu'une nouvelle manifestation de l'effet rebond, formalisé par William Stanley Jevons en 1865. Les gains en efficacité induisent automatiquement la baisse du coût associée aux ressources. Sans régulation des marchés et des usages, ils provoquent une croissance de la consommation globale (figure 1).

Pour autant, cela ne signifie pas qu'améliorer l'efficacité énergétique des ordinateurs est condamnable en soi. Au contraire, c'est l'unique solution pour maintenir des performances avec des ressources énergétiques et matérielles limitées : c'est l'approche que nous défendons pour les technologies quantiques dans ce qui suit.

Avantages quantiques

Actuellement, les puissances de calcul et les efficacités énergétiques des calculateurs classiques arrivent à saturation. Cet essoufflement motive la communauté du numérique à rechercher des technologies alternatives. Grâce à la cohérence, la superposition et l'intrication quantiques, les ordinateurs quantiques promettent une accélération exponentielle de la vitesse de calcul par rapport à leurs homologues classiques, en fonction de la taille et de la nature des problèmes à résoudre [2].

Cet « avantage computationnel » est prédit pour des processeurs idéaux, sans erreurs. En réalité, les processeurs quantiques sont bruités, avec des taux d'erreurs dépassant actuellement les 0,1 % par opération, une valeur rédhibitoire pour la plupart des algorithmes. Deux voies sont actuellement envisagées. À court terme, on souhaite créer des algorithmes pouvant fonctionner sur de tels processeurs bruités. Ce nouveau para-



I Figure 1 : Efficacité énergétique et effet rebond. Une machine consomme des ressources matérielles et énergétiques pour réaliser une tâche avec une performance M. Son efficacité est définie par le ratio $\eta = \frac{m}{n}$

digme pour le calcul quantique est appelé NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum). La deuxième voie est la correction d'erreur quantique. Celle-ci repose sur un grand nombre de qubits dits physiques pour créer des qubits corrigés propres au calcul, dits qubits logiques. Ce nombre varie de 30 à 10 000 selon les technologies de qubits employées. Les mécanismes associés de correction d'erreur augmentent considérablement le nombre d'étapes de calcul.

Dans les deux cas, la démonstration d'un avantage computationnel pour des processeurs quantiques réels est une question ouverte et activement explorée, tant expérimentalement que théoriquement. A l'opposé, la question de l'empreinte énergétique du calcul quantique est pour l'instant restée une lettre morte des stratégies de déploiement, qui se focalisent sur les défis scientifiques et technologiques à relever pour créer des ordinateurs quantiques utiles. Pour autant, nous soutenons qu'il est essentiel de s'y intéresser dès maintenant et le plus en amont possible. Le fait que nous opérions dans un monde aux ressources finies est un fait, et cela impacte la façon dont nous devrions déployer toute technologie nouvelle. D'autre part, les ordinateurs quantiques pourraient être moins énergivores que les ordinateurs classiques pour résoudre un même problème (figure 2). Cet avantage quantique énergétique pourrait devenir leur motivation première – mais

le faire émerger requiert des efforts de recherche importants et spécifiques.

Efficacité énergétique

Pour adresser ces questions, la clef est de modéliser et d'optimiser l'efficacité énergétique de calculateurs quantiques réels, en tenant compte des ressources utilisées pour le contrôle et la correction d'erreur. En tant que ratio d'une performance sur une ressource, cette efficacité énergétique est une quantité hybride :

• La performance de calcul émerge au niveau fondamental, et résulte de la capacité à contrôler le processeur quantique bruité pour qu'il effectue un algorithme avec une certaine précision. Comprendre et optimiser ces mécanismes relève du contrôle quantique, de la thermodynamique quantique, de la correction d'erreur quantique et de l'algorithmique.

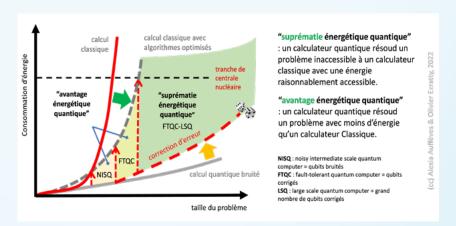
• Réciproquement, établir un contrôle satisfaisant au niveau quantique requiert la mise à disposition de ressources au niveau macroscopique, qui fixe la consommation énergétique nécessaire à la réalisation du calcul. C'est le domaine des technologies habilitantes comprenant la cryogénie, l'électronique de contrôle, le câblage, les lasers, les amplificateurs, les détecteurs...

On comprend dès lors la nécessité d'une démarche pluridisciplinaire, les optimisations énergétiques impliquant des paramètres provenant de multiples champs d'expertise. Il est essentiel de mettre en place un modèle de calculateur couplant les différents niveaux de description, ainsi qu'un langage et des concepts communs. Sur cette base, la méthodologie est extrêmement simple :

- une performance visée au niveau microscopique définit une relation implicite entre les différents paramètres du modèle;
- la consommation énergétique macroscopique est alors minimisée sous cette contrainte.

Premiers résultats

Nous avons appliqué notre méthodologie sur un modèle d'ordinateur quantique supraconducteur, qui a donné lieu



I Figure 2 : Différents régimes d'avantage énergétique quantique.

- à la première démonstration d'avantage quantique [3]. Nous avons considéré des algorithmes typiques employés pour l'optimisation, les simulations physiques, l'apprentissage machine quantique ainsi qu'en cryptanalyse pour la factorisation de nombres entiers. Nous avons intégré dans la modélisation (voir figure 3):
 - les sources du bruit quantique affectant les qubits ;
 - les ressources de contrôle classique des qubits tels que l'électronique qui génère des pulsations micro-ondes et des tensions, les filtres et atténuateurs, la cryogénie, les câbles et les amplificateurs utilisés pour la lecture de l'état des qubits;
 - les sources de dissipation thermique intervenant dans toute la chaîne matérielle et en particulier dans le cryostat;
 - La taille du code utilisé pour corriger les erreurs. Plus précisément, nous avons considéré le code dit de Steane, l'un des plus gourmands en ressources mais aussi l'un des mieux documentés. Les prédictions que nous avons réalisées sont donc pessimistes, et les consommations énergétiques pourront être réduites en considérant d'autres types de codes.

Le modèle permet d'établir une relation entre les paramètres microscopiques du processeur comme la fidélité des qubits, avec les paramètres macroscopiques de contrôle des qubits. Il permet de minimiser la consommation énergétique de l'ordinateur complet, sous contrainte d'atteindre une performance de calcul visée [4].

Naturellement, les résultats dépendent fortement de la fidélité des gubits : un gain d'un facteur 10 entraîne un gain énergétique d'un facteur 100. Nous avons pu adresser des questions impactant fortement la construction de l'ordinateur, telle que la température de l'électronique de contrôle. Pour des technologies de type CMOS avec une hypothèse de consommation de 2 mW par qubit [5], la température ambiante est préférable. Avec des technologies à base d'électronique supraconductrice, placer l'électronique au niveau du processeur semble la meilleure solution. Dans le premier cas, la contrainte technologique se situe dans le câblage qu'il faut trouver le moyen de simplifier, essentiellement par des techniques de multiplexage avancées.

Enfin, nous avons étudié la possibilité d'observer un avantage quantique de nature énergétique. Nous avons calculé la consommation d'énergie minimale

conventional (super) computer (super) co

superconducting qubits model

Niveau macroscopique

Ressources = consommation électrique pour la cryogénie et l'électronique de contrôle

Paramètres = câblage, multiplexage, atténuateurs, amplificateurs, électronique de contrôle, étages de cryogénie

Niveau fondamental

Paramètres = caractéristiques des qubits (fidélité, connectivité), modèle microscopique de la tolérance aux pannes et code de correction d'erreur.

Performance = calcul réussi.

source: « Optimizing energy efficiency for full-stack quantum computers » par Marco Fellous-Asiani, Jing Hao Chai, Yvain Thonnar Hui Khoon Ng, Robert S. Whitney et Alexia Auffèves, 2022. arXiv:2209.05469

■ Figure 3 : Modèle « full-stack » d'ordinateur quantique supraconducteur couplant un niveau quantique et un niveau macroscopique de description.

Les auteurs

Alexia Auffèves est directrice de



est directrice de recherche CNRS au MajuLab (Singapour). Elle est spécialisée en thermodynamique quantique

et en énergétique des technologies quantiques. Elle a lancé en 2022 la Quantum Energy Initiative. Ancienne élève de l'ENS de Lyon et licenciée en philosophie, elle a effectué sa thèse en physique quantique expérimentale sur les chats de Schrödinger et la frontière classique-quantique dans le groupe de Serge Haroche au LKB de l'ENS.

Olivier Ezratty est consultant et au-



teur spécialisé dans les technologies quantiques, notamment des ouvrages de référence «Com-

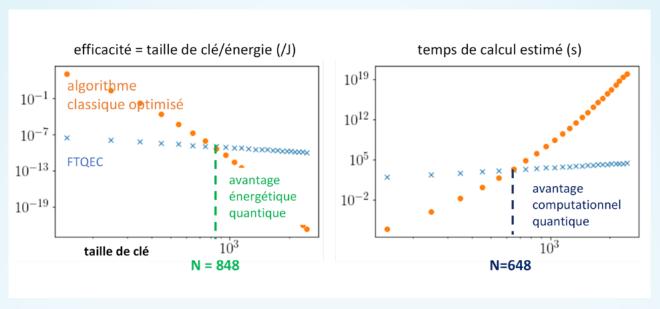
prendre l'informatique quantique» (septembre 2020) et sa version en anglais «Understanding Quantum Technologies» (septembre 2021 en 2022), diffusés gratuitement en PDF. Il anime deux séries de podcasts (Quantum et Decode Quantum) avec Fanny Bouton. Il est aussi enseignant et formateur sur les technologies quantiques à l'EPITA, au CEA INSTN ainsi que pour Capgemini Institut, expert pour Bpifrance et personnalité qualifiée du plan France 2030.

Robert Whitney est chargé de recherche



CNRS au LPMMC (Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés) du CNRS à Grenoble.

C'est un physicien spécialisé dans les questions de thermodynamique intervenant dans les circuits nanométriques et dans la dissipation en mécanique quantique. Il travaille sur l'énergétique du calcul quantique depuis 2019.



I Figure 4 : Premiers résultats d'estimation de l'avantage énergétique quantique. Source : Rob Whitney, Marco Fellous-Asiani et Alexia Auffèves.

d'un ordinateur quantique à tolérance de panne pour factoriser un entier de N bits et l'avons comparée au record de factorisation classique d'une clé RSA. La factorisation classique est connue pour être un problème extrêmement difficile et le record a été établi en 2021 par une équipe Inria sur un supercalculateur basé en Allemagne, pour la factorisation d'une clef de 829 bits [6]. Cela a nécessité la consommation de 965 GJ, soit une puissance de 1,3 MW sur 8,6 jours. Nos modèles montrent qu'un ordinateur quantique opérant avec des qubits 2000 fois plus fidèles que ceux de Google en 2019, associés à un code de Steane, demanderait 2,7 GJ, soit 2,9 MW pendant 16 minutes, qui est la quantité d'énergie contenue dans environ 75 litres de fioul. Ce serait 350 fois moins d'énergie que celle utilisée par le superordinateur. Casser une clé RSA de 2048 bits est inaccessible à un supercalculateur classique. Sur un ordinateur quantique du même type que précédemment, la consommation d'énergie serait de 38 GJ, soit 7 MW pendant 1,5 heure.

Nous avons réalisé nos estimations pour différentes tailles de clef dans le cas classique et dans le cas quantique (figure 4), donnant accès à une efficacité énergétique dans chaque cas. Un avantage quan-

" La factorisation classique est connue pour être un problème extrêmement difficile et le record a été établi en 2021 par une équipe Inria sur un supercalculateur basé en Allemagne, pour la factorisation d'une clef de 829 bits."

tique énergétique est manifeste à partir de N=848. Cet avantage énergétique est de nature différente de l'avantage computationnel, qui considère uniquement le temps de calcul. Les deux avantages sont ainsi atteints pour des tailles de clef différentes. Rappelons que le code correcteur envisagé est gourmand en ressources et que le résultat serait bien moindre avec, par exemple, un code de surface.

Quantum Energy Initiative

Les travaux présentés ci-dessus sont une première étape dans le développement d'une approche pluridisciplinaire et systémique de l'empreinte énergétique des technologies quantiques. Cette approche est le cœur de la Quantum Energy Initiative (QEI), dont les grandes lignes sont présentées dans une Perspective publiée par la revue PRX Quantum [7].

La QEI ambitionne d'appliquer la méthodologie présentée ci-dessus à l'ensemble des types de qubits mis au point par les laboratoires de recherche et entreprises dans le monde. Cela comprend notamment les qubits silicium, les qubits à ions piégés, à base d'atomes neutres et enfin, de photons. Les trois principaux paradigmes de calcul quantique devront aussi être évalués, à savoir le calcul programmable à portes quantiques, le recuit quantique et la simulation quantique. Cela permettra d'exploiter la dimension énergétique pour les comparer et les mettre à l'échelle. Ces efforts mettent aussi en jeu l'ensemble de la chaîne logicielle du calcul quantique et en particulier les codes de correction d'erreur, les algorithmes et les compilateurs.

Ces travaux pourront déboucher sur la mise en place d'un système de bench-

marking de type « Q-Green 500 » permettant de comparer les meilleurs ordinateurs quantiques du point de vue de leur efficacité énergétique. Ils constitueront également une base pour la création d'outils et de modèles visant à dimensionner les architectures des ordinateurs quantiques du point de vue énergétique en intégrant l'ensemble de leurs composantes matérielles - quantiques et classiques - et logicielles. Ils fourniront des éléments de feuille de route et des cahiers des charges aux entreprises du secteur des technologies habilitantes comme par exemple, des repères de référence de la consommation énergétique des systèmes d'électronique de contrôle.

Enfin, la QEI déborde le calcul quantique et a vocation à s'élargir rapidement à l'ensemble des technologies quantiques, à savoir les télécommunications, les capteurs, et la métrologie quantiques. La QEI a été lancée à partir d'une équipe interna-

tionale de chercheurs basée en France et à Singapour. Elle s'étend actuellement à des équipes de recherche et des startups qui mettent au point des qubits dans les principales technologies du marché. Elle s'inscrit dans une démarche d'innovation responsable regroupant toutes les parties prenantes d'un riche écosystème d'acteurs [8]. Par cercles concentriques, elle a vocation à s'étendre à l'échelle européenne puis mondiale pour prendre à bras le corps un sujet incontournable.

Références

- [1] Top500, Juin 2022, https://www.top500. org/lists/top500/2022/06/
- [2] Understanding Quantum Technologies, Olivier Ezratty (2022, cinquième édition), dont les chapitres de vulgarisation sur le calcul quantique et sur les technologies habilitantes PDF téléchargeable sur oezratty. net et arXiv:2111.15352.
- [3] Quantum supremacy using a programmable superconducting processor and supplemental materials, F. Arute, et. al, Nature 574, 505 (2019).
- [4] Optimizing resource efficiencies for scalable full-stack quantum computers par Marco Fellous-Asiani, Jing Hao Chai, Yvain Thonnart, Hui Khoon Ng, Robert S. Whitney,

Alexia Auffèves (2022) en cours de publication - https://arxiv.org/abs/2209.05469

- [5] A Scalable Cryo-CMOS 2-to-20GHz Digitally Intensive Controller for 4×32 Frequency Multiplexed Spin Qubits/Transmons in 22nm FinFET Technology for Quantum Computers par Patra, Bishnu; Van Dijk, Jeroen P.G.; Corna, Andrea; Xue, Xiao; Samkharadze, Nodar; Sammak, Amir; Scappucci, Giordano; Veldhorst, Menno; Vandersypen, Lieven M.K.; Babaie, Masoud, 2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference, https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:cf53a0cb-6cd0-4244-ac19-eb55765c68f9/datastream/OBJ/download
- [6] The State of the Art in Integer Factoring and Breaking Public-Key Cryptography by Fabrice Boudot, Pierrick Gaudry, Aurore Guillevic, Nadia Heninger, Emmanuel Thomé and Paul Zimmermann, June 2022. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03691141
- [7] Quantum technologies need a quantum energy initiative par Alexia Auffèves, PRX Quantum (2022) -https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.3.020101 et https://quantum-energy-initiative.org/
- [8] Mitigating the quantum hype, Olivier Ezratty (2022) arXiv: 2202.01925, qui évoque notamment les contours d'une innovation responsable dans les technologies quantiques.

Résumé

Les technologies quantiques promettent de calculer plus vite, de mesurer plus précisément et de communiquer de façon plus sûre que leurs équivalents classiques. De nombreux défis scientifiques et technologiques doivent être relevés pour qu'elles deviennent une réalité. Alors que l'accent s'est porté jusqu'à présent sur les performances brutes, une initiative est lancée pour qu'une approche systémique de leur empreinte énergétique soit développée dès leur conception. La Quantum Energy Initiative vise à mettre en synergie la recherche fondamentale et l'industrie pour maximiser l'efficacité énergétique des technologies quantiques, avec la motivation de faire émerger un avantage quantique de nature énergétique. La volonté est d'engager le plus en amont possible un processus d'innovation responsable partagé par les acteurs de l'écosystème quantique international.

Abstract

Quantum technologies promise to compute faster, measure more accurately and communicate more securely than their classical counterparts. Many scientific and technological challenges must be overcome for them to become a reality. While the focus so far has been on raw performance, an initiative is being launched to ensure that a systemic approach to their energy footprint is developed from their design. The Quantum Energy Initiative aims to bring together fundamental research and industry to maximize the energy efficiency of quantum technologies, with the motivation of creating a quantum energy advantage. The aim is to engage as early as possible in a process of responsible innovation shared by the actors of the international quantum ecosystem.

Ressources minérales et systèmes énergétiques

Olivier Vidal, Hugo Le Boulzec

Institut des Sciences de la Terre, CNRS, Université de Grenoble-Alpes La récente envolée du prix des matières premières et de l'énergie nous rappelle notre dépendance aux ressources fossiles. Cette évolution est-elle systémique ou uniquement conjoncturelle ?

Introduction

Les matières premières sont utilisées pour construire toute l'infrastructure technologique des sociétés développées, pour produire ses bâtiments, ses moyens de transport et de communication, son infrastructure industrielle et énergétique, sa nourriture et ses médicaments. Les matières premières sont donc, comme l'énergie, des ingrédients indispensables au fonctionnement de nos sociétés modernes. Les tensions d'approvisionnement dans une période de reprise économique post-COVID-19 et d'invasion russe de l'Ukraine nous rappellent cette évidence. Ces tensions se traduisent par des flambées du prix de l'énergie, mais également des métaux. Il s'agit d'une situation conjoncturelle, mais les tensions existaient avant l'épisode COVID-19, marquées par de fortes fluctuations des prix, non seulement pour des métaux spécifiquement utilisés dans les technologies avancées, mais aussi pour des métaux de base comme le cuivre, qui est essentiel dans le cadre de la transition énergétique.

Le déséquilibre conjoncturel entre la demande et l'offre et la rapide augmentation des prix est une piqure de rappel concernant notre forte dépendance aux importations de matières, l'Europe consommant 20 % des métaux produits mondialement alors qu'elle en produit moins de 3 % dans ses frontières. La France, quant à elle, ne produit aucun

métal primaire, ce qui nous placerait dans une situation de forte vulnérabilité si les difficultés d'approvisionnement devenaient systémiques. Cette éventualité n'est pas à proscrire, car les hausses de prix des métaux sont observées dès le début du siècle, au moment de l'émergence économique de la Chine qui est devenue le premier consommateur de ressources minérales. D'autres pays peuplés comme l'Inde, l'Asie du Sud-Est, une partie de l'Afrique pourraient emboiter le pas de la Chine et maintenir la croissance de la demande.

C'est dans ce contexte que se pose la question de la disponibilité des matières premières pour la transition énergétique, cette dernière impliquant une modification complète de notre infrastructure de production, stockage, transport, distribution et utilisation de l'énergie. Cette mutation qui demande beaucoup de métaux de toutes sortes, doit être analysée au niveau national mais aussi au niveau mondial, car tous les pays doivent effectuer la même mutation en même temps.

Ensuite vient la question des capacités d'approvisionnement. La disponibilité des ressources fossiles dépend des technologies de production, du type et de la qualité des gisements de minerai contrôlant les coûts de production et de la proportion de produits recyclés en fin de vie. Au cours du dernier siècle, la consommation de ressources minérales (gravier et sable,

ciment, minerais, minéraux industriels) a augmenté à un rythme moyen de 2 à 5 % par an. Les prédictions répétées d'épuisement à court terme n'ont jusqu'à présent pas été vérifiées par des pénuries réelles. Au contraire, le stock de réserves a augmenté grâce au progrès technologique, qui permet d'exploiter de nouvelles ressources de moins bonne qualité mais plus abondantes au même coût. Cette tendance donne l'impression trompeuse qu'une croissance perpétuelle est possible dans un monde fini, la Terre. Trompeuse car comme pour toutes les activités anthropiques, l'amélioration technologique se heurte inévitablement à des limites thermodynamiques qui, une fois atteintes, ne permettent plus de gain d'efficacité. Cette situation n'a jamais été vécue dans le passé, mais elle pourrait apparaître dans un futur proche.

Evolution de la demande en ressources minérales

Evolution tendancielle

La demande d'une région en ressources minérales varie en fonction de son développement économique et démographique. Durant l'émergence économique, elle est contrainte par la création des infrastructures de l'énergie, industrielles, de transport, communication et urbaines. Cette phase correspond à une croissance rapide du PIB par habitant, et la demande en ressources minérales se

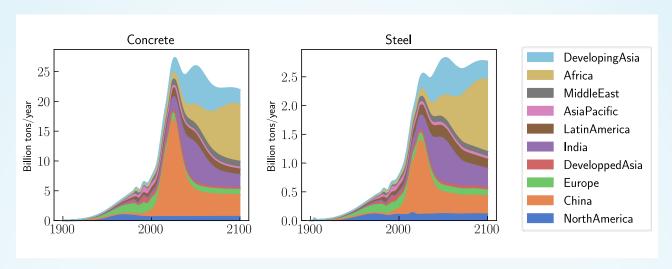


Figure 1 : Evolution cumulée des consommations de béton et d'acier fondée sur des croissances logistiques de toutes les infrastructures régionales calculées pour des croissances également logistiques du PIB et de la population (Vidal et al. [1]).

stabilise quand le PIB/hab atteint environ 20 000 USD/hab. Au-delà de cette valeur, la majorité des infrastructures sont déjà construites et la production de matières premières permet son renouvellement et son adaptation aux évolutions démographiques et technologiques.

> L'évolution du nombre d'unités technologiques par habitant (nombre de voitures, de m² construits, de machines à laver, etc...), en fonction du PIB par habitant, suit ainsi une sigmoïde de loi logistique qui permet de reproduire l'évolution passée de l'infrastructure. En faisant l'hypothèse que les pays actuellement peu développés et en développement suivront une trajectoire similaire à celle suivie par les pays actuellement développés, cette fonction logistique permet de prédire l'évolution future de l'infrastructure pour une évolution de PIB/hab imposée.

> Chaque technologie correspond à une intensité matière (e.g. quantité de différentes matières par voiture, m² construit, machine à laver, etc.). Il devient alors possible de calculer le stock de matière dans l'infrastructure. Pour des durées de vie, taux de collecte et de recyclage imposés, on peut ensuite calculer les consommations annuelles en différentes matières, les flux de matière primaire (provenant

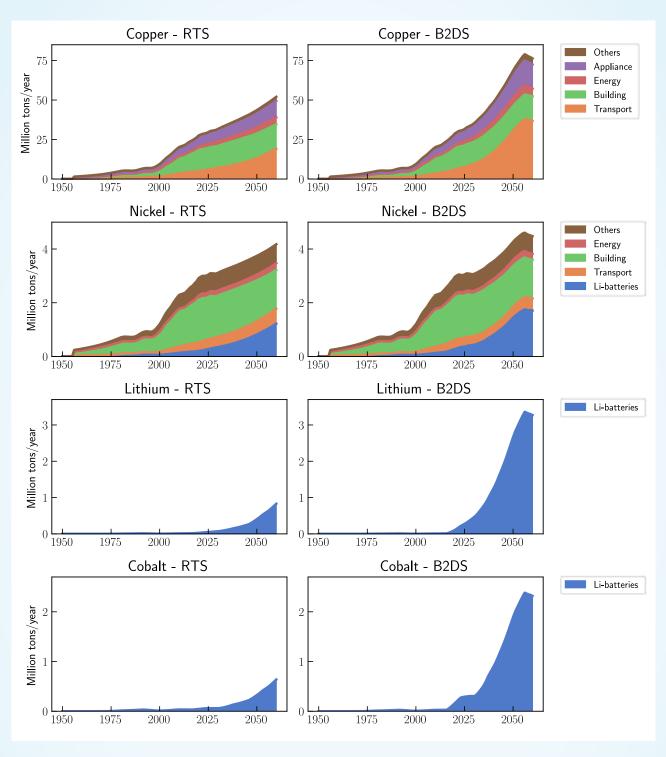
de la mine) et recyclée, et les pertes (utilisations dispersives et enfouissement) qui doivent être équilibrées par des apports primaires supplémentaires. Les estimations sont faites par matière dans toutes les technologies pour différentes régions mondiales identifiées sur la base d'un niveau comparable d'évolution de PIB/habitant. L'évolution mondiale est obtenue en additionnant les besoins de chaque région (figure 1). Cette approche totalement ascendante, qui part des évolutions locales du PIB et de la démographie, permet de relier la consommation mondiale de matériaux aux développements économiques, démographiques, et technologiques locaux. Elle reproduit les évolutions observées depuis la seconde guerre mondiale.

Au-delà des besoins pour la construction de l'infrastructure, la hausse du niveau de vie semble aussi induire une altération de l'efficacité énergétique, les régions à revenu élevé utilisant plus d'énergie par unité de consommation finale que les régions à faible revenu (Andrieu et al. [2]). Cette observation contredit la croyance commune selon laquelle un PIB plus élevé est corrélé à une meilleure efficacité. L'efficacité énergétique s'améliore au cours du temps, mais pas de manière plus rapide dans les pays développés que dans les pays plus pauvres.

Le poids de la transition énergétique

La transition énergétique engendre de nouveaux besoins par rapport à l'évolution tendancielle décrite précédemment, car les infrastructures solaires et éoliennes ont une intensité matière (en tonne/kW) plus importantes que celles utilisant des combustibles fossiles et nucléaires ([3][4] [5]). Les énergies de flux solaires et éoliennes ont en effet une faible densité, et de grandes infrastructures doivent être déployées pour capturer l'énergie et la transformer en électricité, ce qui nécessite de grandes quantités de matériaux. A puissance installée égale, les éoliennes et les PV demandent par exemple 5 à 15 fois plus de béton, acier, cuivre ou aluminium que les centrales thermiques classiques à flamme ou le nucléaire. Les écarts sont plus grands si l'on rapporte la masse de matériaux utilisés à l'énergie produite, en raison des facteurs de charge des installations.

A ces besoins s'ajoutent ceux des infrastructures et des installations de stockage permettant l'intégration des sources électrogènes non pilotables dans le réseau électrique, ainsi que ceux des technologies utilisant l'électricité. Les véhicules électriques par exemple utilisent 3 à 4 fois plus de cuivre que les véhicules thermiques, une batterie Li-ion contenant du lithium, du cobalt, du



I Figure 2 : Demande annuelle en cuivre, nickel, lithium, et cobalt, calculée pour une évolution des infrastructures selon les scénarios : a) de référence (RTS) (panneau de gauche), et au-delà de 2°C (B2DS) (panneau de droite) de l'Agence Internationale de l'énergie ¹ (Vidal et al. [1].

nickel et du manganèse dans le cas de la technologie Li-NMC, et éventuellement un aimant permanent contenant des terres rares. Les besoins agrégés de métaux dépendent de la quantité d'énergie produite, du type de technologies bas-carbone employées sur toute la chaine de l'énergie et de la vitesse de transition envisagée. Ceci est illustré sur la figure 2, qui montre les différences de consommation mondiale de cuivre, lithium, cobalt et nickel pour deux scénarios énergétiques contrastés: RTS (scénario des technologies de référence) et B2DS (scénario supposant un réchauffement global moyen inférieur à deux degrés) de l'AIE

(2017). Pour ces deux scénarios, les besoins additionnels sont principalement contrôlés par l'électrification du parc de véhicules légers. Le même constat est fait

¹ IEA. *Energy Technology Perspectives* 2017; Technical report; IEA: Paris, France, 2017.

 au niveau français, où l'électrification du transport double les besoins en cuivre, et multiplie par 10 la demande en lithium et cobalt à horizon 2050.

Les contraintes d'approvisionnement primaire

En combinant les évolutions tendancielles et celles des transitions numériques et énergétiques, la demande en métaux à horizon 2050 sera multipliée par un facteur 2 à 3 pour l'acier et le béton, 4 pour le cuivre, et 10 à 40 pour nombre de métaux technologiques utilisés dans les secteurs de l'énergie et du numérique. Il s'agit d'un défi de taille, dans un monde où l'approvisionnement est déjà tendu et les impacts environnementaux de la production sont déjà sérieux. Aujourd'hui, environ 12 % de la consommation d'énergie totale au niveau mondial et près de 40 % de la consommation industrielle sont utilisés pour produire les matières premières. Au cours du siècle dernier, l'amélioration de l'efficacité énergétique des différents procédés de production de matière a permis de compenser les surcoûts entraînés par la nécessité d'exploiter des minerais à plus faible teneur, quand les gisements les plus riches sont épuisés.

Cette évolution n'est pas pérenne car il existe une limite thermodynamique qui ne peut pas être dépassée. Cette limite correspond à l'énergie minimale nécessaire pour casser un oxide, sulfate, sulfure ou silicate contenant le métal en ses constituants élémentaires. Elle est donnée par l'énergie libre de formation du minéral à partir de ses constituants. Dans le cas du fer, la limite est d'environ 10 MJ/kg. Il fallait 50MJ pour produire un kilogramme de d'acier en 1950, il en faut 25 aujourd'hui et nous nous approchons de la limite thermodynamique. La même observation est faite pour tous les métaux.

Quand l'amélioration technologique ne compensera plus la baisse de qualité des gisements exploités, les coûts de production et les prix des métaux augmenteront inexorablement, à un rythme proportionnel "Au cours du siècle dernier, l'amélioration de l'efficacité énergétique des différents procédés de production de matière a permis de compenser les surcoûts entraînés par la nécessité d'exploiter des minerais à plus faible teneur, quand les gisements les plus riches sont épuisés."

à la consommation. Une évolution similaire est anticipée pour les ressources énergétiques fossiles. Le taux de retour énergétique (quantité d'énergie produite par énergie investie) était de 50 pour 1 en 1930 pour le pétrole, il est aujourd'hui inférieur à 10 pour le gaz et le pétrole. Comme pour les métaux, l'amélioration technologique a permis d'accéder à de nouveaux types de gisement (en mer, ultra-profond, pétrole de roche mère, gaz de schiste) en maintenant les coûts de production. Mais comme pour les métaux également, l'idée d'une amélioration technologique éternelle de l'extraction primaire est un mythe, car elle viole les lois de la thermodynamique. Nous serons inexorablement confrontés à un double problème si nous restons dépendants des énergies fossiles : 1) un prix de l'énergie croissant et 2) des coûts de production en hausse, supérieure pour les métaux, car les gisements restants sont plus difficiles à exploiter et l'énergie est plus chère 2. Cela ne signifie pas que les ressources seront épuisées, mais que leur coût de production primaire deviendra prohibitif.

La date précise du début de cette évolution n'est pas connue avec précision. Il est possible qu'elle soit déjà atteinte pour certains métaux comme le cuivre, l'argent ou le nickel, composants essentiels de la transition énergétique avec les technologies actuelles. Un changement technologique « de rupture » sera alors envisagé, pour exploiter des ressources qui ne l'étaient pas auparavant, comme les gisements sous-marins pour les métaux, ou éventuellement des ressources devenues accessibles par bouleversement climatique (e.g. gisements arctiques). Aucune de ces solutions n'est souhaitable, pour des raisons environnementales évidentes.

La hausse des prix arrivera et il faut la préparer pour diminuer son impact tout en s'assurant que les besoins pour la transition énergétique seront satisfaits. Ce point est important car nous sommes en face d'une situation paradoxale : la transition énergétique est source de surconsommation de ressources minérales et d'énergie pour les produire, mais c'est aussi la clef de notre futur car elle offre la possibilité de maintenir l'accès à une ressource énergétique pérenne à un prix raisonnable. La clef de la réussite réside dans notre capacité à organiser le partage de ces ressources au niveau mondial le temps de la transition.

Des pistes à explorer

La production domestique comme levier éthique et stratégique

La transition énergétique est un enjeu mondial et tous les pays, quel que soit leur niveau de développement, sont concernés. Les pays développés utilisent majoritairement des ressources importées depuis des pays en développement économique. Dans ces conditions, la transition énergétique des pays riches dépendrait d'une extraction de matière

² A court terme, la crise ukrainienne démontre déjà la sensibilité de l'industrie de manufacture de métaux aux prix du gaz et de l'électricité, avec la fermeture temporaire de hauts fourneaux en Pologne et Slovaquie, ou la réduction de la production en France et en Allemagne.

dans des pays plus pauvres, qui en supportent tous les impacts environnementaux associés. Quand ces pays pauvres auront le niveau économique suffisant pour envisager la construction de leur infrastructure énergétique décarbonée, auront-ils accès à la ressource de qualité nécessaire, ou sera-t-elle entièrement immobilisée dans l'infrastructure bâtie plus tôt dans les pays riches ?

> Les pays les plus pauvres - représentant la moitié de la population mondiale - auront besoin de disposer de ressources minérales pour construire leur propre infrastructure d'énergie, dans des zones où l'utilisation du rayonnement solaire et du vent sont souvent optimales (abondantes et d'EROI plus élevé). Pour éviter que ces pays soient in fine privés des capacités en raison d'un accès difficile aux ressources minérales, les pays riches doivent accepter d'extraire leurs ressources minérales sur leur propre territoire. Cela nécessite d'améliorer les technologies d'exploitation pour garantir la minimisation des impacts et l'adhésion citoyenne, qui est de plus en plus compromise en Europe ³.

Le recyclage comme levier stratégique, énergétique et environnemental

Les principales phases du recyclage d'un métal sont la collecte, le tri et le broyage des produits en fin de vie, suivi de la fonte et du raffinage des métaux. Par rapport à la production primaire, l'énergie consommée est réduite d'environ 80 % pour l'acier, 75 % pour le cuivre, ou 95 % pour l'aluminium. Dans le cas de la transition énergétique, les déchets métalliques des infrastructures installées actuellement ne seront collectés que dans plusieurs dizaines d'années et seul un démantèlement des infrastructures de la chaîne d'approvisionnement en énergies fossiles pourraient

"La transition énergétique est un enjeu mondial et tous les pays, quel que soit leur niveau de développement, sont concernés. Les pays développés utilisent majoritairement des ressources importées depuis des pays en développement économique."

représenter une source conséquente de matières premières recyclées, principalement pour l'acier (Le Boulzec et al. [6]) et une augmentation générale des taux de collecte des déchets métalliques toutes applications confondues ⁴.

Pour un spectre plus large de matières premières, un recours massif à la production primaire restera l'option dominante. Le recours croissant à des technologies de pointe où les métaux sont dilués et coûteux à récupérer est un frein au recyclage. Il serait prudent de minimiser les applications gadgets des nouvelles technologies, notamment pour les applications connectées inutiles. Une grande proportion de l'industrie du recyclage est actuellement installée en Asie, en Inde et en Afrique, où les pays développés exportent leurs déchets métalliques et importent des produits raffinés. Cela s'explique par un coût de recyclage plus élevé dans les pays disposant de normes environnementales plus contraignantes. Cette disparité des normes diminue également le potentiel de réduction de l'impact environnemental du recyclage ainsi que son caractère stratégique.

Des stratégies nationales comme levier stratégique

La prise de conscience de la dépendance croissante aux matières premières pour les technologies énergétiques et numériques a conduit plusieurs acteurs institutionnels à initier une réflexion à partir du milieu des années 2000. Le concept de criticité d'une matière première 5 a été défini par le Conseil National de Recherche (NRC) des Etats-Unis d'Amérique en 2006, selon deux variables : l'intensité d'utilisation et la disponibilité. Cela a mené à l'identification d'une liste de matières premières qualifiées de critiques, qui évolue au cours du temps. Le Département de l'Intérieur américain a ainsi présenté une liste de 50 matières premières non énergétiques en 2022, tandis que la Commission européenne a actualisé sa liste à 30 matières en 20206.

Aux états unis, Joe Biden a invoqué le *Defense Production Act* pour développer rapidement la production primaire et secondaire domestique de lithium, nickel, cobalt, graphite et manganèse, matériaux utilisés dans la production de batteries Li-ion de grande capacité ⁷. En France, le rapport Varin sur l'approvisionnement de l'industrie en matières premières minérales identifie, sans surprise, les mêmes substances.

³ Voir les exemples récents d'opposition sociale à l'ouverture de mines de lithium en Serbie et au Portugal.

⁴ Le taux de collecte moyen du cuivre atteint 78 % en Europe (EU28) contre seulement 44 % en Amérique du Nord (Loibl and Tercero Espinoza [5]);

⁵ Le concept de criticité présente de nombreuses définitions différentes dans la littérature académique et institutionnelle, incorporant parfois des variables environnementales, de substituabilité, etc.

⁶ Ces listes sont en forte augmentation au cours du temps. La Commission européenne avait ainsi identifié 14 matières en 2011, et le Département de l'Intérieur Américain 35 matières en 2018.

⁷ Le président Biden a initié cette mesure le 31 mars 2022. Voir : https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/03/31/memorandum-on-presidential-determination-pursuant-to-section-303-of-the-defense-production-act-of-1950-as-amended/

Emmanuel Macron a souligné l'enjeu de sécurisation à l'accès aux matières premières lors de la présentation du plan France 2030. A l'échelle européenne, Ursula von der Leyen a elle aussi annoncé le projet d'implémenter un EU Critical Raw Materials Act, afin de consolider la chaine d'approvisionnement en matières premières critiques, primaires et secondaires. Ces stratégies régionales doivent cependant être accompagnées d'un réalisme économique, notamment pour le recyclage, puisque les capacités actuelles européennes ne représentent qu'une partie du volume de déchets générés et que les futurs métaux ne seront recyclés que si le coût du recyclage est comparable à celui dans les pays asiatiques.

Au-delà de ces stratégies de pays riches axées sur les capacités croissantes de production, une réflexion sur la maîtrise de la demande en matières premières est nécessaire. Cet axe de recherche est présent dans la littérature institutionnelle et académique (e.g. Pauliuk et al. [6], United Nations Environment Programme [7]), sous la dénomination « d'efficacité matière ». Celle-ci correspond à i) la réduction de l'intensité matière d'une technologie à performance égale, ii) l'extension de la durée de vie ou l'augmentation de l'intensité d'utilisation des technologies, iii) une réflexion sur les habitudes de consommation individuelle, par exemple sur l'utilisation et la taille des véhicules personnels. Ces stratégies qui relèvent du bon sens sont encore trop rarement initiées par les industriels.

Conclusion

La demande en ressources minérales pour produire les matières premières va continuer à croître au cours des prochaines décennies, tirée par le développement économique des pays très peuplés et les transitions énergétique et numérique. La nature et les quantités de ressources minérales sont dépendantes des différents types d'utilisation, qui varient selon l'organisation et le niveau de développement des sociétés. Afin de confronter les contraintes de demande et d'offre, le développement de modèles dynamiques est nécessaire. Pour la demande, les besoins émergeant de la transition énergétique doivent être estimés par une approche tenant compte de l'évolution des mix énergétiques et des tendances socio-économiques régionales. Pour l'offre, une approche physique reposant sur l'évolution de la qualité des gisements et de l'énergie nécessaire pour les produire, du prix de l'énergie et du progrès technologique, permet d'identifier une future hausse systémique du coût de production et du prix des matières primaires Cette contrainte économique agira en conjonction avec des contraintes stratégiques, énergétiques et environnementales.

Dans un contexte de transition énergétique, les enjeux industriels et sociétaux sont majeurs. Plusieurs stratégies se mettent en place, dont la production domestique dans les pays actuellement importateurs, le recyclage, la sécurisation et la diversification de l'approvisionnement ainsi que l'efficacité matière des technologies. Ces solutions cristallisent les enjeux socio-environnementaux actuels entre les pays présentant des niveaux de développement différents, notamment à travers les oppositions à une reprise de la production domestique dans plusieurs pays développés. Pourtant il s'agit d'une question éthique : refuser l'extraction domestique possible revient à exporter les impacts de notre consommation vers des pays où les technologies employées ne sont pas les meilleures. Accepter de gérer les impacts environnementaux de notre consommation permettrait de développer les meilleures technologies pour les minimiser. Une vision globale de la transition énergétique est donc nécessaire, qui va bien au-delà des questions technologiques. Cette vision doit inté-

Les auteurs

Olivier Vidal



est chercheur
CNRS-INSU à
l'Institut des
Sciences de la
Terre, Grenoble.
Après un doctorat en minéralo-

gie expérimentale, il s'est spécialisé dans la modélisation thermodynamique et cinétique des réactions minérales, avec des applications dans les domaines des sciences de la Terre, du stockage des déchets radioactifs ou du CO₂, et de la production d'hydrogène naturel. Ses recherches portent aujourd'hui sur le lien entre énergie et matériaux bruts dans le contexte de la transition énergétique vers une société à faible émission de carbone.

Il a été coordinateur scientifique du réseau européen ERA-MIN sur le traitement industriel des matières premières non énergétiques (http://www.era-min-eu.org/), et il est impliqué dans plusieurs projets multidisciplinaires en collaboration avec des économistes.

Hugo Le Boulzec est chercheur



c est chercheur post-doctorant au laboratoire d'économie appliquée de Grenoble (GAEL). Ses recherches

se concentrent sur l'utilisation de matières premières minérales et métalliques dans le cadre de la transition énergétique, et sur la modélisation des co-bénéfices et risques liés à la qualité de l'air.

grer non seulement la demande future en énergie par pays, mais également les besoins en ressources et leur provenance.

· · · Références

- [1] Olivier Vidal, Hugo Le Boulzec, Baptiste Andrieu, and François Verzier. "Modelling the Demand and Access of Mineral Resources in a Changing World." Sustainability 14, no. 1 (December 21, 2021): 11. https://doi.org/10.3390/su14010011.
- [2] Baptiste Andrieu, Olivier Vidal, Hugo Le Boulzec, Louis Delannoy, and François Verzier. «Energy Intensity of Final Consumption: the Richer, the Poorer the Efficiency". Environmental Science & Technology, (2022),:56 (19), 13909-13919. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c03462.
- [3] Olivier Vidal, Fatma Rostom, Cyril François, and Gael Giraud. "Global Trends in Metal Consumption and Supply: The Raw Material–Energy Nexus." Elements 13, no. 5 (October 1, 2017): 319–24. https://doi.org/10.2138/gselements.13.5.319.
- [4] Olivier Vidal, Hugo Le Boulzec, and Cyril François. "Modelling the Material and Energy Costs of the Transition to Low-Carbon Energy." Edited by L. Cifarelli and F. Wagner. EPJ Web of Conferences 189 (2018): 00018. https://doi.org/10.1051/epjconf/201818900018.
- [5] Olivier Vidal, Bruno Goffé, and Nicholas Arndt. "Metals for a Low-Carbon Society." Nature Geoscience 6, no. 11 (November 2013): 894–96. https://doi.org/10.1038/ngeo1993.
- [6] Hugo Le Boulzec, Louis Delannoy, Baptiste Andrieu, François Verzier, Olivier Vidal, and Sandrine Mathy. "Dynamic Modeling of Global Fossil Fuel Infrastructure and Materials Needs: Overcoming a Lack of Available Data." Applied Energy 326 (November 2022): 119871. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119871.
- [7] Antonia Loibl, and Luis A. Tercero Espinoza. "Current Challenges in Copper Recycling: Aligning Insights from Material Flow Analysis with Technological Research Developments and Industry Issues in Europe and North America." Resources, Conservation and Recycling 169 (June 2021): 105462. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105462.
- [8] Stefan Pauliuk, and Niko Heeren. "Material Efficiency and Its Contribution to Climate Change Mitigation in Germany: A Deep Decarbonization Scenario Analysis until 2060." Journal of Industrial Ecology 25, no. 2 (April 2021): 479–93. https://doi.org/10.1111/jiec.13091.
- [9] United Nations Environment Programme. Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want. UN, 2020. https://doi.org/10.18356/689a1a17-en.

Résumé

L'humanité utilise les ressources minérales à un niveau sans précédent et la demande va continuer à croître au cours des prochaines décennies, alimentée par les transitions énergétique et numérique et le développement économique des pays très peuplés. La nature et les quantités de ressources minérales nécessaires dépendent des différents types d'utilisation, qui varient selon l'organisation et le niveau de développement des sociétés. La demande en matières premières doit donc être estimée selon une approche dynamique et régionalisée, prenant en compte les différents scénarios de développement, notamment pour ce qui concerne les utilisations énergétiques et le déploiement de sources renouvelables ou décarbonées. L'estimation de la capacité d'offre doit tenir compte des coûts énergétiques et de production, lesquels sont contrôlés par la qualité des ressources et le taux d'amélioration technologique soumis lui-même aux limites thermodynamiques.

Abstract

Humanity uses mineral resources at an unprecedented level and demand will continue to grow in the coming decades, fueled by energy and digital transitions and economic development in highly populated countries. The nature and quantities of mineral resources needed depend on the different types of use, which vary according to the organization and level of development of societies. The demand for raw materials must therefore be estimated according to a dynamic and regionalized approach, taking into account the different development scenarios, particularly with regard to energy uses and the deployment of renewable or decarbonized sources. The estimation of supply capacity must take into account energy and production costs, which are controlled by the quality of resources and the rate of technological improvement - itself subject to thermodynamic limits.



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