

PAR YVES BAMBERGER (66)



membre de l'Académie
des technologies,
conseiller scientifique
du président d'EDF

Un grand système sociotechnique, le **système électrique**

Les « grands systèmes sociotechniques » sont de véritables intégrateurs fonctionnels des sciences et des techniques au service de la société. Le système électrique en est un parfait exemple.

■ Faisons une rapide promenade à la découverte du système électrique. Nous partirons de la production centralisée, puis, passant par le réseau de transport et celui de la distribution, nous en parviendrons aux usages. C'est là l'héritage du xx^e siècle. L'arrivée de la production distribuée, des NTIC et de la dérégulation en induit une transformation plus ou moins bien maîtrisée.

Produire et transporter

Les *centrales hydroélectriques* au fil de l'eau ou avec un réservoir sont le royaume de la mécanique des fluides incompressibles et du génie civil, même si les parties mécaniques et électriques sont évidemment indispensables. Dans les *centrales thermiques classiques*, la physique et la chimie de la combustion constituent le point de départ. La thermodynamique apparaît pour gérer les rendements. Le génie mécanique joue ensuite le rôle principal. Dans les *centrales nucléaires*, la physique nucléaire, les couplages irradiation-thermique-mécanique (des écoulements et des structures) s'ajoutent aux problématiques des centrales classiques. Leur conception a nécessité nombre d'expérimentations et de simulations. Pour toutes les centrales, comme pour tout ce que l'homme fabrique, les développements de la science des matériaux et des techniques de fabrication et de construction jouent un rôle clé.

Le réseau de transport à très haute tension est le support de la mutualisation de la production et de la consommation, il garantit la sûreté de notre alimentation en électricité et l'optimisation de nos factures. Maillé, il trans-

REPÈRES

Lorsque nous appuyons sur un interrupteur, nous ne pensons pas aux millions d'éléments du système, qui, depuis les barrages ou les centrales et *via* les réseaux, font que la lumière s'allume. Nous ne pensons pas aux dizaines de milliers de personnes qui travaillent pour faire fonctionner ce système. Nous ne pensons pas non plus que ce système est le fruit des découvertes et des réalisations de nombreux savants, inventeurs et ingénieurs. Ni qu'il mobilise l'électromagnétisme, la thermodynamique, la mécanique des solides et des fluides, la neutronique, la chimie, la science des matériaux et les mathématiques, et bien sûr l'économie.

porte l'électricité vers les grandes zones de consommation ; une vente d'électricité de la France à l'Allemagne passe parfois par la Belgique ou la Suisse.

Le réseau de distribution, arborescent à partir de postes de transformation du réseau de transport, conduit le courant jusqu'aux compteurs de nos logements et de nos bureaux. Grâce aux lois de l'électrotechnique et malgré les variations de la consommation, l'opérateur de réseau sait, sauf exception, assurer jusqu'en bout de ligne une alimentation de qualité en termes de tension et d'intensité, et cela de manière sécurisée.

De l'éclairage à la climatisation

Le premier usage de l'électricité fut l'éclairage, public et privé, avec l'invention et le déploiement de la lampe électrique, largement dus à Edison. C'est l'effet Joule qui le rend possible, par le rayonnement qu'il provoque lors de l'incandescence du filament chauffé par le courant. Le chauffage électrique utilise lui aussi cet effet, soit grâce à des convecteurs qui élèvent la température de l'air, soit par l'intermédiaire de panneaux qui rayonnent en infrarouge.

**L'opérateur
de réseau
sait assurer
jusqu'en bout
de ligne une
alimentation
de qualité**



© Olivier White

Les centrales hydroélectriques sont le royaume de la mécanique des fluides.

La fameuse « pointe électrique » des soirs d'hiver, dénoncée par certains, largement due en fait aux chauffages d'appoint des maisons non chauffées à l'électricité, va être dépassée par les pointes aléatoires liées à l'usage des énergies renouvelables (éoliennes, photovoltaïque) promues par les mêmes.

Enfin, les pompes à chaleur, de plus en plus utilisées dans le monde pour le chauffage et la climatisation, et pour la récupération de chaleur dans l'industrie, sont fondées sur des cycles thermodynamiques de fluides qui changent de phase.

Un défi permanent

L'une des spécificités du système électrique est qu'il contient peu de moyens de stockage. Il faut donc assurer à chaque instant l'équilibre entre production et consommation de manière sûre (avoir des marges sur les capacités des lignes, avoir des réserves de production à la hausse et à la baisse) et stable (éviter des situations où l'indisponibilité imprévue d'une ligne ou d'une centrale provoquerait un effacement en cascade). Cela nécessite des prévisions pluriannuelles pour mettre en place les moyens nécessaires, mais aussi des prévisions de la veille pour le lendemain prenant en compte la vie du pays, le discours à venir du président de la République ou le match au Stade de France en passant par la météo et

Stocker et turbiner

L'outil dominant de stockage dans le monde est constitué par les stations de pompage-turbinage (STEP) qui sont des centrales hydrauliques où l'eau est pompée d'un lac inférieur vers un lac supérieur lorsque l'électricité est peu chère puis turbinée ensuite.

les prix de production. Il y a là, pour les aficionados du genre, de beaux modèles de simulation et d'optimisation sous contraintes, avec des échelles de temps et d'espace (Europe, France) diversifiées. Les actions en temps réel sont de la responsabilité de l'opérateur du système (en France, le Centre national d'exploitation du système du réseau de transport d'électricité) qui dispose de télécommunications et de télécommandes, mais aussi d'outils performants de simulation.

En France, la puissance totale des STEP est environ 5 GW, soit un peu moins de 5% de la puissance totale du système.

Un progrès permanent

En ce début du XXI^e siècle, tous les sous-systèmes du système électrique classique voient leurs performances progresser. Les turbines hydrauliques dépassent des rendements de 90 %, les centrales à gaz des rendements de 60 %, les pompes à chaleur atteignent des performances à faire rétrospectivement frémir Carnot.

Par ailleurs, les énergies renouvelables, solaires, éoliennes et marines, vont faire passer le nombre de points de production en Europe de quelques milliers à des centaines de millions, et, bien maîtrisées, elles pourraient contribuer à traiter les problématiques du développement durable. Les nouveaux usages, notamment celui des véhicules hybrides, rechargeables ou électriques, peuvent permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre, la pollution aux particules fines ainsi que les importations de produits pétroliers.

Investir dans les réseaux

Pour aller plus loin, il s'agit d'abord d'investir dans les réseaux, en particulier dans le réseau de distribution qui devient un réseau de

**Prévoir la veille
pour le
lendemain
en prenant
en compte
la vie du pays**

- *circulation* de l'électricité, la production photovoltaïque sur les toits pouvant à certaines heures de la journée inverser le sens du courant. Il faut donc modifier les protections de ces réseaux, introduire de nouveaux capteurs (pour que l'opérateur du réseau de distribution puisse jouer son rôle au service des consommateurs), bref mettre en place ce qu'on appelle aujourd'hui dans le jargon international des *smartgrids*.

Renforcer le stockage

Il faut ensuite renforcer la robustesse de fonctionnement d'ensemble du système pour qu'il puisse assurer un rôle toujours plus efficace, que ce soit en termes d'équilibre entre production et consommation ou de prise en compte des modifications rapides de la production renouvelable intermittente.

On peut assurer tout ou partie de ces régulations grâce aux centrales hydrauliques, fossiles ou nucléaires.

On peut aussi choisir d'effacer la production renouvelable si elle trop forte et si elle met le système en danger, ou de renforcer la flexibilité ou la capacité d'effacement d'une partie de la consommation pour différentes durées, ou de renforcer la capacité de stockage centralisée ou décentralisée.

Ces diverses solutions techniques ont des coûts spécifiques et elles concernent des acteurs différents.

Une vision systémique nationale et européenne

Onze millions de cumulus

Un des leviers peu coûteux pour influencer la courbe de consommation est de mobiliser les chauffe-eau à accumulation. EDF le fait depuis plus de cinquante ans en faisant fonctionner automatiquement aux heures creuses plus de 11 millions de cumulus dans nos logements pour ceux qui ont choisi l'option correspondante. Cela mobilise plus de 10 GW pendant plusieurs heures (plus que les STEP) et utilise sur l'année près de 5% de la consommation. Il est paradoxal que la réglementation thermique dans le neuf, la RT2012, interdise *de facto* l'installation de nouveaux cumulus, donc d'une capacité de stockage supplémentaire « gratuite », qui pourrait être couplée à la production des renouvelables, obligeant par là même à installer des chauffe-eau au gaz plus de cinq fois plus émetteurs de CO₂.



Chauffe-eau à accumulation, une capacité de stockage à domicile.

Des choix politiques

Le choix, ou plutôt l'équilibre entre ces solutions, est la conséquence de choix politiques et nécessite une vision systémique non seulement nationale mais aussi européenne.

En Europe, on observe depuis plus de dix ans une croissance des prix de l'électricité pour le citoyen, l'affichage d'un marché de l'électricité et la création de tarifs de rachat, la mise sur le même plan d'une finalité (-20% d'émissions de CO₂) et de deux moyens (20% d'énergies renouvelables et 20% d'amélioration de l'efficacité énergétique) et enfin l'instabilité des régulations du domaine de l'électricité (qui empêche les projets et la création d'emplois). N'y a-t-il pas des leçons à tirer des succès et des erreurs des vingt ans de dérégulation ?

Depuis bientôt un siècle, le pourcentage de l'électricité dans l'énergie finale utilisée par les hommes augmente : nous en sommes à 25% en France, à 16% en moyenne dans le monde même si plus d'un milliard de personnes n'y ont pas encore accès.

Le développement d'un système électrique « décarboné » est un moyen (le seul peut-être en l'état actuel des sciences et des techniques) de répondre aux enjeux du développement durable dans le domaine de l'énergie.

La priorité pour la « transition énergétique » en France n'est-elle pas d'agir à tous les niveaux, dans la maison et dans l'industrie comme dans les transports, pour accélérer l'électrification de notre pays en renforçant un *mix* électrique « décarboné », et cela au moindre coût pour nous tous ? ■

Remettre en culture non seulement la science, mais aussi les techniques, leurs applications et l'innovation

Par Claudie Haigneré, ancien ministre, présidente d'Universcience

Associant « science en train de se faire », « science en culture », « science et techniques au quotidien », « science et technique pour tous », Universcience et ses deux sites¹ s'efforcent de réinventer les cultures scientifique, technique, industrielle et de l'innovation.

UNE GRANDE DIVERSITÉ DE PUBLICS

Depuis vingt-huit ans que s'est ouverte, dans le parc de la Villette, la Cité des sciences et de l'industrie CSI, voici venue « la première génération CSI » à fréquenter les espaces de la Cité des Enfants avec ses enfants, accueillis à partir de l'âge de deux ans. Un éveil aux sciences et aux technologies (le « fameux chantier » entre autres) par le plaisir du jeu pour ces derniers, avec parfois l'éveil de vocations pour leurs parents. Les deux millions de visiteurs annuels de la CSI y découvrent, à côté du « Grand Récit de l'Univers » ou des progrès des mathématiques, ou de l'exploration du cerveau, ce qu'on peut attendre de la science au service du quotidien, qu'il s'agisse de l'espace, de l'énergie ou des transports, ou encore des apports des innovations technologiques au sein de l'observatoire qui les actualise en permanence. Associant compréhension et émotion, nos expositions temporaires et les conférences et médiations associées leur permettent de s'interroger sur la voix, de remettre en question ce qu'ils pensent connaître des Gaulois, de s'approprier le B.A. BA de l'économie, de s'initier à la façon dont l'art robotique peut transformer la création artistique, de s'étonner de la complexité de création des jeux vidéo. Quelque 700 000 enfants du primaire et du secondaire viennent chaque année à la Cité avec leurs professeurs bénéficier de médiations adaptées à leurs programmes, en quête du déclic et de l'inspiration leur permettant de construire en groupe un projet expérimental.



© Virginia Castro

DES LIEUX INNOVANTS D'EXALTATION DE LA CRÉATIVITÉ

Dans ce siècle où l'information est partout accessible et parfois en excès, où le développement accéléré des technologies est souvent déconcertant, où chacun doit être en capacité d'exercer son esprit critique et créatif pour être un citoyen engagé et responsable, notre mission d'établissement culturel s'est sensiblement transformée. Au-delà du partage des savoirs scientifiques et des savoir-faire techniques, nous proposons désormais des lieux ouverts, véritables plateformes de vie et de créativité, collaboratifs, conçus en communauté d'intérêt pour des adolescents, des postadolescents, des familles, des amis, des groupes scolaires accompagnés par des tuteurs. Ces lieux se situent, au sein de la nouvelle Zone 3, dans la salle immersive Callisto ou dans le Carrefour numérique puissance 2 où émergent mille réalisations techniques et numériques favorisant les rencontres et les coopérations. À côté de ses ressources documentaires et « transmédias », la bibliothèque BSI se transforme en *living center* et met maintenant à la disposition de nos visiteurs des services innovants dans la convivialité, allant du tutorat à l'accompagnement par la Cité des métiers en passant par le *do it yourself* dans une nouvelle culture de l'innovation et de la créativité.

Au carrefour des mondes scientifique, éducatif, culturel et industriel, dans ce lieu exigeant mais de confiance et d'heureuse neutralité qu'est Universcience, nous exerçons avec passion notre mission de médiation et de passeurs, pour aiguïser le désir et le plaisir d'apprendre et d'entreprendre. ■

1. L'établissement public Universcience regroupe depuis 2010 le Palais de la découverte et la Cité des sciences et de l'industrie (CSI).