



Jacques Percebois

Les prix de l'électricité

Marchés et régulation

Jacques Percebois, *Les prix de l'électricité. Marchés et régulation*, Jacques Percebois, Paris, Presses des Mines, collection Énergie et développement durable, 2023.

© Presses des MINES - TRANSVALOR, 2023

60, boulevard Saint-Michel - 75272 Paris Cedex 06 - France

presses@mines-paristech.fr

www.pressesdesmines.com

© Couverture: Pixabay

ISBN: 978-2-38542-414-5

Dépôt légal: 2023

Achévé d'imprimer en 2023 (Paris)

Cette publication a bénéficié du soutien de l'Institut Carnot M.I.N.E.S.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et d'exécution réservés pour tous les pays.

LES PRIX DE L'ÉLECTRICITÉ

MARCHÉS ET RÉGULATION

Collection Énergie et développement durable

Dans la même collection :

OSE Association Événement
La place du numérique dans la transition énergétique

Mélanie Douzic
L'empreinte chimique

Renaud Gicquel
Systèmes énergétiques Tome III

Renaud Gicquel
Systèmes énergétiques Tome II

Renaud Gicquel
Systèmes énergétiques Tome I

OSE Association Événement
Le rôle du Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) dans la transition énergétique

Julien Garcia, Tatiana Reyes, Stéphane Le Pochat, Louis Dupuy, et Anne-Laure Capomaccio
Monétarisation, Quels enjeux pour l'écoconception ?

Marilys Pradel (dir.), Guillaume Busato, Stéphanie Muller
Mineral resources in Life Cycle Assessment - EcoSD Annual Workshop 2020

Lynda Aissani (dir.)
Spatialization in LCA
Interests, feasibility and limits of eco-design

Isabelle Blanc
EcoSD Annual Workshop

Junqua Guillaume, Brulot Sabrina
Écologie industrielle et territoriale

Association Événement OSE
Énergie, citoyens et ville durable

Labaronne Daniel
Villes portuaires au Maghreb

Emmanuel Garbolino
Les bio-indicateurs du climat

Bruno Peuportier (dir.)
Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures

Bruno Peuportier (dir.)
Livre blanc sur les recherches en énergétique des bâtiments

Association Événement OSE
Smart grids et stockage

Ouvrage coordonné par Gilles Guerassimoff, Nadia Maïzi
Smart grids

François Mirabel
La Déréglementation des marchés de l'électricité et du gaz

Fabrice Flipo, François Deltour, Michelle Dobré, Marion Michot
Peut-on croire aux TIC vertes ?

Benjamin Israël
Quel avenir pour l'industrie dans les places portuaires ?

Association Événement OSE
Eau et Énergie

Ouvrage coordonné par Bruno Duplessis et Charles Raux
Économie et développement urbain durable 2

Ouvrage coordonné par Gilles Guerassimoff, Nadia Maïzi
Eau et Énergie : destins croisés

Jacques Percebois

LES PRIX DE L'ÉLECTRICITÉ

MARCHÉS ET RÉGULATION

PRÉFACE

L'évolution climatique impose des bouleversements dans le paysage énergétique mondial. D'une part l'usage des énergies fossiles doit être proscrit lorsqu'il existe des moyens de substitution plus respectueux pour l'environnement. D'autre part, la transition vers un paysage moins carboné demande du temps pour développer les moyens technologiques indispensables à sa réalisation. Au-delà de la disponibilité des équipements et des matériaux nécessaires à leur fabrication, la production d'électricité ne cesse d'augmenter pour répondre aux besoins croissants des usages qui tendent à s'électrifier. Après une nécessaire réflexion d'action sur les réductions des consommations, l'électrification semble une voie privilégiée dans tous les secteurs d'activité pour assurer la décarbonation des usages.

Le vecteur électrique, déjà indispensable dans de nombreuses activités, devient aussi incontournable dans celles pour lesquelles nous avons encore un choix sans cette contrainte d'émissions de gaz à effet de serre. Cette globalisation de l'usage de l'électricité n'est pas sans soulever de nouvelles contraintes plus économiques et géopolitiques sur un système de plus en plus interconnecté. Même dans un monde où l'autoconsommation dominerait tous les secteurs d'activité, l'usage de l'électricité implique une adéquation entre production et consommation afin d'assurer la résilience du système. Interviennent alors les notions de prix à payer pour l'usage de cette énergie électrique échangée. Dans ce monde interconnecté, la question de l'établissement du prix devient de plus en plus complexe. Pour ne citer que l'Europe et la France en particulier, l'ouverture des marchés de l'électricité à la concurrence depuis le début des années 2000 a mobilisé de nombreux acteurs pour faire évoluer le système et s'adapter aux nouveaux modes de tarification. Cette dernière doit aussi refléter les coûts de production et d'acheminement avec, dans un contexte international, la création de marchés et leurs régulations afin d'assurer le bon fonctionnement de toute l'activité économique qui en dépend.

L'ouvrage de Jacques Percebois, Professeur Émérite de l'Université de Montpellier et économiste de l'énergie de renommée internationale, nous fait entrer au cœur des mécanismes de formation des prix de l'électricité. Afin d'assurer au lecteur une connaissance complète de cette énergie, Jacques Percebois commence par nous faire remonter le temps pour redécouvrir l'histoire de la fée électricité à travers une série de personnages à l'origine des théories fondatrices ayant permis le développement de l'énergie électrique. Cette chronologie et ce voyage sur tous les continents nous permet de mieux cerner les choix qui ont façonné le

système électrique actuel. Ces bases établies, la notion de mix énergétique est abordée pour montrer la nécessité du changement dans la structure même des moyens de production pour tendre vers la neutralité carbone à horizon 2050. Les notions de coûts sont ensuite présentées avec une grande pédagogie permettant d'aborder le vif du sujet: la formation des prix dans toute sa complexité. Cette partie donnera au lecteur une compréhension des fondamentaux qui permettent de mieux appréhender les mystères de la volatilité des prix de l'électricité sur les marchés. Enfin, la filière nucléaire en tant que production décarbonée spécifique est détaillée. En effet, sa structure particulière au regard des autres filières produisant des kilowattheures bas carbone a un impact sur la formation des prix.

Cet ouvrage est le fruit d'une très longue expérience d'enseignement et de recherche dans l'économie de l'énergie. Il est l'aboutissement d'un savant dosage à effectuer pour transmettre un savoir et passionner les étudiants sans les perdre dans un mélange pluridisciplinaire trop dense et indigeste.

Jacques Percebois transmet sa passion du monde de l'énergie à nos étudiants du Mastère Spécialisé en Optimisation des Systèmes Énergétiques (Mastère OSE), organisé par le Centre de Mathématiques Appliquées (CMA) de Mines Paris – PSL.

Depuis maintenant 23 années, Jacques Percebois participe activement à la formation de notre vingtaine d'ingénieurs et managers annuels venant se spécialiser dans le monde très pluridisciplinaire de l'énergie. Faisant partie du module dédié à l'économie de l'énergie, organisé par le CREDEN (Centre de Recherche en Economie et Droit de l'Énergie) de la faculté des sciences économiques de l'Université de Montpellier que dirige Jacques Percebois, son enseignement de la tarification de l'énergie, apprécié à l'unanimité par les étudiants du Mastère OSE en est une des briques fondamentales. Depuis ces 23 années, Jacques Percebois a fait évoluer son contenu afin qu'il reflète les perpétuelles mutations des marchés de l'énergie tout en assurant aux étudiants l'acquisition de toutes les bases pour un décryptage de l'actualité économique de l'énergie.

Nous pensons que les décideurs doivent comprendre et maîtriser tout un éventail de connaissances afin d'être suffisamment armés pour opérer les bonnes décisions en matière de choix énergétiques. Le Mastère Spécialisé OSE est une formation pluridisciplinaire permettant d'avoir un éclairage complet sur ce monde par une approche originale basée sur la prospective et l'optimisation. Elle aboutit à un processus d'aide à la décision, indispensable à la réalisation de projets faisant intervenir de l'énergie qui est par définition variée et multiforme. Il faut donc être en mesure d'évaluer les différents choix énergétiques qui peuvent être envisagés selon différents critères et sous de nombreuses contraintes. Un processus de décision technique dans le monde de l'énergie ne peut être complet et pertinent

sans prendre en considération ses composantes économiques, environnementales et sociétales. Le but de la formation est donc de donner à ses diplômés tous les éléments leur permettant de formaliser ce type d'approche.

Le cours de Jacques Percebois est une composante fondamentale que les étudiants doivent maîtriser dès le début de leur cursus afin de mettre à profit la formation dans son ensemble.

Son ouvrage profitera sans aucun doute à un grand nombre de professionnels désireux de décrypter le monde de l'énergie dans lequel ils naviguent actuellement. Il sera aussi très utile à d'autres professeurs qui auront dans cet ouvrage une référence à recommander à leurs étudiants sur les rouages de la formation des prix de l'électricité.

Pour terminer, je tiens à remercier vivement Jacques Percebois pour son implication et son accompagnement depuis la création du Mastère Spécialisé OSE. Sans la mise en œuvre de ce module, notre formation n'aurait pas eu le succès qu'elle rencontre toujours après ces 23 années. Merci encore Jacques de nous avoir fait l'amitié de prendre le temps de formaliser cet enseignement et de proposer cet ouvrage qui servira de référence encore de nombreuses années, non seulement au sein de notre formation, mais aussi auprès des professionnels de l'énergie.

Gilles Guerassimoff.

Professeur, Directeur Adjoint du Centre de Mathématiques Appliquées

Mines Paris - PSL.

Responsable du Mastère Spécialisé OSE.

« Jacques Percebois adresse ses vifs remerciements à Gilles Guerassimoff, responsable du mastère OSE à l'École des Mines de Paris, pour son accueil au sein de cette formation depuis plus de 20 ans ; il le remercie également pour l'aide apportée dans la mise en forme de cet ouvrage »

INTRODUCTION

Cet ouvrage a pour ambition d'expliquer comment se forment les prix de l'électricité aujourd'hui en France. L'électricité est un produit particulier, sur le plan technique car elle ne se stocke pas à grande échelle, sur le plan économique car c'est un service public donc un produit de première nécessité. Selon le droit administratif en vigueur en France les entreprises en charge d'une mission de service public doivent respecter 3 principes : la continuité (l'opérateur ne doit pas être défaillant), l'égalité de traitement des usagers devant le service public (pas de discrimination qui ne soit fondée sur des critères objectifs) et l'adaptabilité au progrès technique (utiliser les technologies les plus performantes en vigueur). Cette électricité va jouer un rôle croissant dans la mesure où la décarbonation vers une économie zéro émission nette de carbone à l'horizon 2050 va se traduire par une électrification croissante des usages, dans la mobilité en particulier.

Pendant longtemps l'électricité était produite et distribuée par un monopole public ; la libéralisation des industries de réseaux en Europe, à la fin des années 1990, a modifié l'architecture de l'industrie en déléguant au marché une partie de l'activité, à savoir la production et la fourniture du kWh. Mais le reste de l'activité, constituée par les réseaux, demeure une activité monopolistique régulée. Cette coexistence de règles diverses va complexifier la formation des prix d'autant que des exceptions aux règles du marché vont être introduites de façon constante par les pouvoirs publics.

Il importe d'abord de retracer rapidement l'histoire de l'électricité et le rôle qu'ont joué des découvreurs, célèbres pour les uns et oubliés pour d'autres. Il faut aussi présenter le poids de l'électricité dans l'économie, expliquer pourquoi ce poids va s'accroître dans les prochaines années et montrer ce que pourrait être la structure du mix électrique à l'horizon 2050. C'est l'objet du chapitre 1 intitulé « Histoire, usages et acteurs du système électrique ».

Le chapitre 2 est intitulé « Les coûts de l'électricité ». Il existe plusieurs concepts de coûts mais deux d'entre eux vont revêtir une importance particulière : le coût moyen du MWh qui va permettre de sélectionner les investissements à mettre en œuvre pour produire et distribuer l'électricité, et le coût marginal qui va être le critère permettant de sélectionner l'appel des centrales sur le réseau (ce que l'on nomme le *merit order*), que ce soit en économie de marché ou dans un cadre monopolistique d'ailleurs. La technique de l'actualisation permettra d'introduire

une cohérence dans les choix intertemporels, ce qui est nécessaire pour des investissements dont la durée de vie est exceptionnellement longue.

Le chapitre 3 est intitulé «Les prix de l'électricité». C'est le chapitre le plus long car c'est sans doute à ce niveau que la complexité du système est la plus grande. Le principe en économie de marché est que «les prix suivent les coûts» mais avec des exceptions, nous le verrons. Il faut distinguer les prix de gros du marché au jour le jour dit *spot*, les prix à terme, les prix de détail payés par le consommateur final, les tarifs régulés d'accès aux réseaux ou au nucléaire historique, les prix garantis accordés à certaines énergies, etc. Le cœur des débats et de la réforme en cours en Europe porte sur le fonctionnement du marché de gros. Nous présentons ici les divers projets de réforme en compétition.

Le chapitre 4 est intitulé «La filière nucléaire, socle d'une électricité décarbonée». L'accent est mis sur cette énergie parce que c'est une énergie à la fois décarbonée et pilotable qui joue un rôle déterminant en France et qui suscite à nouveau un intérêt en Europe et dans le monde. Il importe de retracer la naissance de cette technologie, de présenter les principaux types de réacteurs en compétition aujourd'hui et de mettre l'accent sur les enjeux financiers auxquels il faut faire face au niveau de la construction des centrales mais aussi à ceux de leur déconstruction et de la gestion des déchets radioactifs.

Cet ouvrage s'efforce d'être simple et limite le recours à la formalisation, sauf lorsque c'est indispensable. Il permet de comprendre pourquoi les prix de l'électricité s'envolent à certaines périodes, pourquoi ils chutent ensuite très rapidement et quels liens existent avec l'évolution du prix du gaz naturel. La très forte volatilité des prix de l'électricité est aujourd'hui considérée comme excessive et requiert une réforme des règles de fonctionnement en vigueur. Mais cela doit se faire dans le cadre des traités européens, du fait notamment du poids des interconnexions transfrontalières.

Cet ouvrage est destiné en priorité aux élèves des Écoles d'ingénieur et aux étudiants de l'Université mais il sera également utile aux professionnels du monde de l'énergie. Il est le fruit d'une longue expérience d'enseignement à l'École des Mines de Paris, à l'Institut Français du Pétrole et des Énergies Nouvelles et à l'Université de Montpellier.

CHAPITRE 1

HISTOIRE, USAGES ET ACTEURS DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

Les inventions qui ont permis le développement de l'électricité méritent d'être rappelées car elles furent le fruit de la recherche menée par des pionniers, des découvreurs parfois oubliés, et elles ont aussi donné lieu à des controverses dont certaines sont encore actuelles (la guerre des courants par exemple).

La situation de l'industrie électrique d'aujourd'hui¹

Le rôle des hommes, les précurseurs ou inventeurs, ne doit pas être sous-estimé. Ces pionniers ont pris des risques et ils ont par leurs décisions façonné les contours de l'industrie électrique d'aujourd'hui. Les évolutions historiques sont différentes selon les pays car le contexte institutionnel n'est pas le même, par exemple aux États-Unis, pays fédéral, et en Europe où domine l'État unitaire. Les ressources énergétiques varient aussi fortement d'un pays à l'autre et cela va conditionner la structure de la production d'électricité. Certains pays disposent de ressources en charbon, en gaz ou en pétrole. D'autres ont accès à de l'hydraulique bon marché. Certains ont peu de ressources sur le sol et sont donc tributaires des importations d'hydrocarbures ou de charbon. Les progrès techniques ont également permis de développer des énergies nouvelles comme l'éolien en mer, le photovoltaïque ou le nucléaire. Ces progrès sont le fruit d'inventions imputables à des hommes illustres et parfois oubliés.

Mickaël Faraday, un autodidacte modeste

Rien ne prédestinait Mickaël Faraday à devenir l'un des plus grands scientifiques de son temps, l'un des pères du moteur électrique notamment². Il est né le 22 septembre 1791 à Newington près de Londres. D'un milieu très modeste (son père est forgeron) il est mis en apprentissage à treize ans chez un relieur, émigré français nommé Ribeau. Il dévore les ouvrages scientifiques qui passent entre ses mains et se fait remarquer des clients de son patron par ses connaissances

1 Cette section reprend de larges extraits d'un ouvrage publié en 2021 par Jacques Percebois et intitulé «L'énergie racontée à travers quelques destins tragiques», Éditions Campus Ouvert, 242 pages (extraits du chapitre 4 «Samuel Insull, le magnat déchu de l'électricité»).

2 Christine Blondel et Bertrand Wolf «Mickaël Faraday, un savant exemplaire?», *Histoire de l'Électricité*, septembre 2011 (www.ampère.cnrs.fr).

exceptionnelles. L'un d'eux l'emmène entendre les conférences d'un grand chimiste de l'époque, sir Humphry Davy, membre de la Royal Institution et de la Royal Society, ce qui va bouleverser sa vie et décider de son destin. Davy s'intéresse tout particulièrement à l'oxyde nitreux, plus connu sous le nom de gaz hilarant. Il vient aussi d'isoler deux éléments chimiques, le sodium et le potassium en décomposant la soude et la potasse grâce à de puissantes piles voltaïques. Le grand sujet du moment chez les scientifiques c'est l'électricité, cette pile électrique que Volta vient de découvrir. Faraday envoie un recueil des notes qu'il a prises lors de ces conférences, ce qui impressionne Davy qui en 1813 l'embauche comme aide-préparateur à la Royale Institution. La Royal Institution de Londres est une société savante fondée en 1799 dans le but de favoriser la vulgarisation des connaissances scientifiques. Faraday voyage en France avec son maître ce qui lui permet de rencontrer Gay-Lussac, Cuvier ou Laplace. Mais l'élève va surpasser le maître et les relations entre Davy et Faraday iront en se dégradant lorsque ce dernier posera sa candidature à la Royal Society en 1823. A l'époque Davy en est le président et il s'oppose à cette candidature par jalousie. Il accuse même Faraday de plagiat. Faraday sera néanmoins élu. On a souvent dit que la plus grande découverte de Davy ce fut Faraday, mais parfois hélas le maître aime bien que l'élève ne lui fasse pas trop d'ombre. Faraday fut également membre correspondant de l'Académie des Sciences en France. C'était un personnage très modeste et fondamentalement gentil ; il ne cherchait ni les honneurs ni les positions lucratives et il refusa même d'être enterré dans l'Abbaye de Westminster aux côtés d'Isaac Newton.

« L'électricité circule dans le fil, pas à côté »

Faraday était un physicien empiriste. Ce n'est pas un théoricien pur. Ce sont ses intuitions et ses expériences qui déterminent ses raisonnements. Sa principale découverte se situe en 1821. Un chercheur danois avait montré que si l'on fait passer de l'électricité dans un fil métallique à proximité d'une boussole, le courant avait pour effet de dévier l'aiguille à angle droit. Un professeur russe, le physicien Emil Lenz, avait fait la même observation en 1820 à Saint-Pétersbourg. C'était difficile pour les chercheurs de comprendre le lien entre ces deux forces, celle de l'électricité et celle de la boussole. Faraday émit l'hypothèse que l'électricité, en circulant dans le fil, pouvait projeter une force extérieure au fil, capable de provoquer ce phénomène, ce qui lui valut de la part de l'un des observateurs présents lors d'une expérience cette réplique demeurée célèbre : « *sachez Monsieur qu'à l'Université de Cambridge on enseigne que l'électricité circule dans le fil, pas à côté!* ». Faraday venait de découvrir l'électromagnétisme.

Mais l'invention la plus prometteuse fut sans doute l'expérience qui suivit. En déplaçant la boussole autour du câble électrique, Faraday conclut que des lignes de

force invisibles circulent autour du câble. Il a alors l'idée d'inverser l'expérience et déplace le câble autour d'un aimant statique. Le câble se met à tourner autour de l'aimant. Il vient d'inventer le moteur électrique. Faraday montre Ainsi, comment un aimant peut tourner autour d'un courant électrique et comment inversement un élément de circuit électrique peut tourner autour d'un aimant. « *C'est le phénomène de l'induction électromagnétique qui est la création d'un courant électrique à l'intérieur de conducteurs placés dans un champ magnétique variable ou qui se déplacent à l'intérieur d'un champ magnétique constant. Cette découverte va être à l'origine de tout le développement de l'industrie électrique: machines électriques tournantes, transformateurs, éclairage* » rappellent Hadjsaïd et Sabonnadière³. Ampère sera le premier à reconnaître l'importance de l'apport de Faraday. Les moteurs électriques utilisés dans l'industrie et les transports, les centrales électriques qui approvisionnent les consommateurs à travers des réseaux de transport et de distribution de l'électricité en sont des applications concrètes, aujourd'hui devenues très banales.

Du moteur au générateur

Le premier vrai moteur électrique sera imaginé par Barlow en 1822: une roue dentée en cuivre dont les pointes plongent dans une cuve de mercure est placée entre les branches d'un aimant en fer à cheval. Quand le courant passe du mercure à l'axe de la roue, elle tourne. C'est ce que les étudiants en physique connaissent sous le nom de *roue de Barlow*. C'est le principe du moteur électrique. Si maintenant cette roue est reliée à un galvanomètre et qu'on lui imprime un mouvement de rotation, un courant permanent est détecté au galvanomètre durant la rotation. Le «moteur» électrique est donc réversible et peut se transformer en «génératrice» capable de transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique. L'idée géniale de Faraday est simple: si un courant électrique est capable de «créer» un aimant, un aimant doit être capable de «créer» un courant. C'est une application du principe de conservation de l'énergie qui explique cette réversibilité: transformation réciproque du travail mécanique en électricité et de l'électricité en travail mécanique. En 1834 le Russe Moritz von Jacobi construira un moteur d'une puissance d'un cheval-vapeur qui propulsera un bateau à roue à aubes sur la Neva à Saint-Petersbourg en utilisant ce principe des électro-aimants mobiles en fer à cheval. L'Américain Thomas Davenport reprendra le principe à Boston en construisant un des premiers véhicules électriques.

Faraday va également être à l'origine du développement de l'électrolyse ce qui ouvrira la voie aux travaux de James Maxwell, l'auteur des fameuses équations qui, en reliant champ électrique et champ magnétique, expliquent les ondes électromagnétiques. James Maxwell, né en 1831 et mort en 1879 à 48 ans

3 Nourredine Hadjsaïd et Jean-Claude Sabonnadière « Histoire de l'électricité: de Thalès à la consommation du xx^e siècle », *Encyclopédie de l'Énergie*, octobre 2015.

seulement, était d'un milieu social très différent de celui de Faraday. Issu de l'aristocratie écossaise, il a fait des études à Edimbourg puis au Trinity College de Cambridge. Il y créera plus tard le «Cavendish Laboratory» d'où sortiront de très nombreux et illustres scientifiques anglais, en particulier dans le domaine du nucléaire. Il est célèbre pour son *Traité d'électricité et de magnétisme*. C'est lui qui va en quelque sorte mettre en équations mathématiques les *lignes de force* de Faraday. Il correspondra d'ailleurs avec Faraday, son aîné de quarante ans qui le félicitera pour ses travaux, lui dont les connaissances mathématiques sont loin d'égaliser celles de son jeune collègue.

Thomas Edison, un autodidacte qui deviendra riche

Un autre autodidacte très inventif va marquer son époque, Thomas Edison. Il est né en février 1847 à Milan dans l'Ohio, dans une famille modeste d'origine canadienne (son père est charpentier). Il sera assistant télégraphiste à la Western Union Co à Toronto au Canada puis à Boston. Il créera une entreprise de recherche industrielle et n'aura de cesse de déposer des brevets, en particulier dans le domaine de l'électricité. On estime qu'il a déposé plus de mille brevets dans sa vie de chercheur. En 1878 il fonde l'Edison Electric Light Co à New York. La Western Edison Light Co fondée à Chicago en 1882 deviendra la Chicago Edison Co qui sera dirigée par Insull avant que ce dernier n'en prenne le contrôle. L'un des mérites d'Edison est également d'avoir recruté Nikola Tesla qui deviendra un grand rival sur le plan des brevets mais sans atteindre sa fortune. Il est intéressant de noter cette complémentarité entre théoriciens et praticiens. Parfois les théoriciens mettent en équations les observations des praticiens. Parfois ce sont les expérimentateurs qui vérifient les intuitions des théoriciens. Edison comme Faraday étaient des expérimentateurs ; Tesla comme Maxwell étaient des théoriciens.

Edison est avant tout un industriel et un businessman. À la différence d'Insull ou de Tesla il finira sa vie très riche et entouré de gloire. En 1879 il présente la première lampe électrique à incandescence avec filaments de carbone dont il dépose le brevet. Elle sera largement commercialisée. Il construit des centrales électriques pour distribuer l'électricité aux usines et à des particuliers. Il crée la General Electric, qui se substitue à la société Edison Electric Light Co, et qui est aujourd'hui encore une multinationale dans le domaine de la production, du transport, de la distribution et des applications de l'électricité. En fait ses machines à courant continu doivent beaucoup aux travaux du Belge Zénobe Gramme et à l'Allemand von Siemens inventeurs de la dynamo. On est dans un tel foisonnement d'inventions à cette époque qu'il est difficile d'attribuer la paternité de certaines découvertes. L'électricité va s'imposer mais certains usagers ne seront pas toujours rassurés face à cette innovation. Ainsi, le 23^e président des

États-Unis, Benjamin Harrison, qui fut le premier président à avoir l'électricité à la Maison Blanche lors de son mandat entre 1889 et 1893, ne touchait jamais un interrupteur de peur d'être électrocuté. Il lui arrivait même paraît-il de dormir la lumière allumée, ne voulant pas courir un tel risque en l'éteignant.

La guerre des courants

Comme le rappelle tout bon manuel de physique, un courant électrique est produit par le déplacement d'électrons dans un milieu conducteur, un métal notamment, sous l'impulsion d'une tension électrique appliquée à ses bornes. Si cette tension est continue le flux d'électrons, de charges négatives, s'écoule uniquement vers la borne positive à laquelle il transmet de l'énergie. Si cette tension est alternative, sinusoïdale, les électrons oscillent alternativement dans un sens et dans l'autre autour de leurs positions moyennes sur une distance de quelques microns. Ils répercutent alors l'énergie vibrationnelle reçue vers l'extrémité positive du conducteur.

Le courant continu est principalement produit par l'activité chimique des batteries et par l'effet photovoltaïque des panneaux solaires. Le courant alternatif est produit par la rotation du rotor d'un alternateur dans des centrales électriques. La vitesse de cette rotation détermine la fréquence du courant. C'est aujourd'hui du 50 Hertz (Hz) presque partout dans le monde sauf aux États-Unis ou au Brésil où l'on a opté pour du 60 Hz. Un courant alternatif de 50 Hz effectue 50 alternances par seconde, ce qui veut dire qu'il change 100 fois de sens par seconde (50 alternances positives et 50 alternances négatives). Il est possible de transformer du courant alternatif en courant continu à l'aide d'un redresseur (par exemple pour charger une batterie) et du courant continu en courant alternatif à l'aide d'un onduleur (comme pour raccorder des panneaux solaires au réseau électrique).

Les turbo-alternateurs que l'on trouve dans les centrales électriques, que ce soit des centrales thermiques fonctionnant avec du fioul, du gaz ou du charbon, ou des centrales nucléaires, sont constitués par l'accouplement d'une turbine et d'un alternateur, machine tournante qui transforme la puissance mécanique d'un fluide en électricité. C'est l'alimentation de la turbine qui varie selon le type de technologie (vapeur produite par la combustion d'une énergie fossile ou par la fission d'un atome).

L'électricité est un *mouvement* comme le rappellent Hansen et Percebois⁴ dont nous reprenons ici un passage: «*Les techniciens de la centrale en étaient restés sans voix... Le directeur financier d'un important investisseur, en visite de terrain, leur avait demandé ce qu'ils faisaient de l'électricité produite et qui n'avait pas été vendue. Le chef de service avait sauvé la*

4 Jean-Pierre Hansen et Jacques Percebois «Transitions électriques: ce que l'Europe et les marchés n'ont pas su vous dire», Éditions Odile Jacob, 2017, 276 pages.

situation en expliquant rapidement que, aujourd'hui et au niveau industriel, l'électricité n'était pas stockable et donc que l'offre et la demande devaient coïncider à chaque instant. La raison est pourtant simple: un mouvement ne se stocke pas». On doit à chaque instant injecter en amont du réseau autant d'électricité que la quantité qui sera soutirée en aval, en prenant en compte en plus les pertes en ligne par effet Joule. Si on a trop d'électricité on peut certes la stocker dans des batteries, recourir à de stations de pompage pour monter de l'eau dans un réservoir amont avant de pouvoir utiliser cette eau pour produire à nouveau de l'électricité plus tard (principe des stations de pompage), ou produire de l'hydrogène en pratiquant l'électrolyse de l'eau. Mais dans ce cas c'est un usage de l'électricité et non un stockage puisque l'on transforme de l'électricité en un autre produit. Un constructeur d'automobiles pourra stocker sur un parking les véhicules fabriqués et qui n'ont pas trouvé d'acheteurs. Un producteur d'électricité ne peut produire que ce qui est consommé instantanément et doit produire en temps réel ce qui est demandé, sauf à mettre en péril son installation.

À la fin du dix-neuvième siècle deux écoles vont s'affronter pour produire et distribuer l'électricité: les partisans du courant continu dont le chef de file est Thomas Edison, d'une part, les tenants du courant alternatif soutenus par Nikola Tesla et George Westinghouse, d'autre part. La bataille fut rude car les enjeux financiers étaient considérables et ce fut l'alternatif qui l'emporta. Aujourd'hui, au vingt et unième siècle, le courant continu connaît un certain renouveau et nous verrons plus loin pourquoi.

Tesla et Westinghouse, les promoteurs du courant alternatif

Nikola Tesla est né en juillet 1856 dans une famille serbe orthodoxe de Croatie. Son père est un prêtre orthodoxe. Il fait de brillantes études secondaires, entreprend des études d'ingénieur à l'École Polytechnique de Graz en Autriche puis à l'université de Prague. Il est embauché à l'Office central du télégraphe de Budapest, dont il devient l'ingénieur en chef. En 1882 il part pour Paris, travaille à la société Edison General Electric Co où il met au point le premier moteur à induction à courant alternatif. Comme cette technologie ne semble pas susciter l'intérêt sur place il part en 1884 pour les États-Unis, où il sera naturalisé et travaillera avec Thomas Edison. Il collabore au développement du réseau électrique alimentant la ville de New York basé sur le courant continu. Mais ce réseau connaît beaucoup de difficultés techniques (pannes, chutes de tension). Cette technologie ne permet pas à l'électricité d'être acheminée sur longue distance, et il faut une centrale de production d'électricité tous les trois ou quatre kilomètres. Comme il n'existe pas de technologie permettant de modifier la tension, l'électricité doit être produite directement à la tension utilisée par les clients, ce qui nécessite un circuit de distribution différent pour chaque type

d'appareil (éclairage public, usage industriel, usage domestique). À New York par exemple il existait plusieurs centrales de 30 kilowatts, distribuant du courant en 110 volts à l'intérieur d'un périmètre qui ne pouvait pas dépasser 5 kilomètres.

Tesla propose à Edison de recourir au courant alternatif mais Edison refuse obstinément. En désaccord avec son patron, Tesla démissionne en 1885 et fonde en 1886 la Tesla Electric Light & Manufacturing mais il est contraint d'en démissionner en raison de désaccords avec ses investisseurs financiers. Il est ruiné d'autant que ses associés conservent la jouissance des brevets dont il était l'inventeur. Aidé par d'autres financiers, il fonde en 1887 la Nikola Tesla Company en prenant cette fois des précautions financières pour ne pas être dépossédé. Il investit beaucoup dans la recherche et construit la première génératrice à courant alternatif qu'il présente au congrès de l'American Institute of Electrical Engineers en mai 1888.

À la même époque George Westinghouse, un ingénieur et businessman de talent, rêve de distribuer l'électricité sur le continent américain en utilisant le courant alternatif et non pas le courant continu d'Edison. Westinghouse est né en 1846 dans l'État de New York. Il est le fils d'un industriel et a participé très jeune à la Guerre de Sécession. Il va s'intéresser à de nombreux secteurs de l'industrie, les télécommunications, les chemins de fer, et, bien sûr, l'électricité. Il va par exemple mettre au point un nouveau système de freinage pour les trains, inventer des postes automatisés pour les appels téléphoniques, ce qui annonce le réseau téléphonique commuté moderne. En 1886 il crée la Westinghouse Electric Company. Il croit à l'invention de Tesla qu'il embauchera pour engager la bataille avec Edison. Westinghouse achètera les droits des brevets de Tesla concernant le générateur de courant alternatif, ce qui procurera des revenus conséquents à Tesla, mais celui-ci devra plus tard renoncer aux redevances lorsque la société Westinghouse sera en grande difficulté financière.

La guerre des courants va s'intensifier⁵. Les enjeux financiers sont considérables et tous les moyens sont bons pour discréditer la partie adverse. Edison fait campagne pour dénoncer les dangers du courant alternatif. Il va même convaincre les autorités du pénitencier de New-York d'utiliser le courant alternatif pour alimenter la chaise électrique destinée à exécuter un condamné à mort, un certain William Kemmler. Comme l'exécution ne se passera pas bien, ce qu'il avait anticipé, il espère Ainsi, que le terme «westinghousé» remplacera le mot «électrocuté»! Edison qui jusqu'alors détenait le monopole de la distribution du courant voulait barrer la route à ce dangereux concurrent et n'hésitait pas à utiliser des arguments publicitaires de mauvais goût voire déloyaux: «*voulez-vous*

5 Christine Blondel et Bertrand Wolf «L'avènement de la fée électricité, 1870-1900», *Histoire de l'Électricité*, décembre 2016 (www.ampère.cnrs.fr).

à la maison et à travers vos rues le courant du bourreau?» disait-il en parlant du courant de Westinghouse.

En 1893 la société Westinghouse obtiendra pourtant le contrat destiné à alimenter la distribution d'électricité sur une grande partie du territoire américain. C'est le succès remporté par l'alimentation en courant alternatif de l'industrie de Buffalo, grâce à une centrale hydroélectrique implantée à 32 kilomètres située à Niagara Falls, qui sera décisif. Le courant alternatif a gagné la bataille. La société d'Edison adoptera ensuite, elle aussi, le courant alternatif. Les deux sociétés continueront à se faire concurrence mais dans l'alternatif. Notons, pour la petite histoire, qu'en 1889 la société Edison réalisera pour le Palais de l'Élysée la première installation parisienne en alternatif. Mais cette bataille a coûté cher aux deux compagnies, celle d'Edison comme celle de Westinghouse, et en 1897 Tesla doit quitter Westinghouse à qui il cède tous ses brevets. Le courant continu ne disparaîtra pas pour autant, surtout en Europe, où il continuera d'alimenter l'éclairage public, le tramway, le métro. Il faut dire que les investissements faits dans ces infrastructures n'étaient pas encore amortis. En France en particulier il restera plus important que l'alternatif jusqu'à la fin des années 1920.

Tesla sera un inventeur prolifique et déposera un grand nombre de brevets (plus de 300) dans des domaines très variés, celui de la radio, du radar et des rayons X grâce à son «shadowgraph». On estime qu'il a découvert ces rayons X, par hasard, avant Röntgen, lequel recevra le Prix Nobel de Physique en 1901 pour cette découverte. À certains égards il peut être considéré comme «l'inventeur» avant la lettre d'internet ou du téléphone portable. Il anticipe cette découverte lorsqu'il écrit : *« dans le futur n'importe qui, sur terre ou en mer, avec un appareil simple et bon marché tenant dans la poche, pourra recevoir des nouvelles du monde entier ou des messages destinés à l'utilisateur »*. Tesla mourra en janvier 1943 dans une chambre d'hôtel à New York, à 86 ans, dans un relatif dénuement. Ses dossiers seront discrètement récupérés par le FBI, notamment parce qu'il s'était intéressé au *rayon de la mort*. Tesla restera longtemps dans l'anonymat. Son nom a quand même été donné en 1960 à l'unité internationale d'induction magnétique. Son lieu de sépulture est à Belgrade, en Serbie, dans le musée Nikola-Tesla. Westinghouse sera lui enterré au cimetière prestigieux d'Arlington du fait de ses états de service durant la guerre de Sécession.

La naissance des réseaux électriques de transport

Il ne suffit pas de produire l'électricité dans des centrales, il faut pouvoir la transporter sur de longues distances si l'on veut alimenter tout le pays et éviter de construire trop de petites centrales sur le réseau. Westinghouse avait compris l'intérêt des économies d'échelle : il faut construire des centrales de forte puissance et transporter l'électricité vers les lieux de consommation, y compris les plus

éloignés. Mais pour cela il faut des innovations techniques. Jusqu'aux années 1880 les consommateurs d'électricité, particuliers ou professionnels, assuraient eux-mêmes leur production d'électricité; celle-ci était parfois transportée mais sur de courtes distances (quelque dizaines ou centaines de mètres) car une grande partie de l'électricité était perdue par échauffement dans le câble, ce que l'on nomme *effet Joule*. Les rendements étaient donc très mauvais, une grande partie de l'électricité ayant été perdue en route.

Un Français, Marcel Deprez⁶, montre que le transport peut se faire avec un rendement correct sur quelques dizaines de kilomètres, à condition d'élever la tension à la source. Tous les élèves doivent se souvenir de ce qu'on leur a appris dans leur cours de physique au Lycée: pour une puissance donnée à transmettre, plus la tension U évaluée en volts est élevée, plus l'intensité I évaluée en ampères qui circule dans le fil est faible. La puissance évaluée en watts est le produit des deux: $P = U.I$. Or, selon la *loi de Joule*, les pertes sont proportionnelles au carré de l'intensité donc à I^2 . Il suffit donc d'accroître U et de réduire I pour les limiter. En 1883 Deprez produit de l'électricité à Vizille, petite ville de la région grenobloise célèbre par son château qui fut longtemps résidence officielle de la Présidence de la République, et la transporte jusqu'à Grenoble, à une quinzaine de kilomètres, en recourant à des tensions de plusieurs centaines de volts.

Le problème n'est pas réglé pour autant car si on élève la tension au départ il faut pouvoir la baisser à l'arrivée au niveau du consommateur final qui utilise des appareils fonctionnant en 110 ou 220 volts. Il faut donc des transformateurs. À l'époque on utilisait déjà des commutateurs pour baisser la tension du courant continu de 3000 à 110 volts. Avec le courant alternatif c'était plus compliqué. Le Français Lucien Gaulard et le Britannique John Gibbs vont proposer des transformateurs par induction (qu'ils construisent ensemble et nomment *générateurs secondaires*), s'appuyant également sur les travaux de Faraday et Tesla. Les réseaux de transport et de distribution du courant vont pouvoir se développer à grande échelle. On trouvera parfois des systèmes mixtes associant transport en courant alternatif avec desserte locale en courant continu. À la sortie des centrales, on élève la tension pour limiter les pertes durant le transport, puis on l'abaisse à l'entrée des villes et à proximité du consommateur. Il faut pour cela des transformateurs qui permettent de passer de la haute voire très haute tension (400 000 volts puis 220 000 volts aujourd'hui par exemple en France) à de la moyenne puis à de la basse tension (220 volts voire 110 volts dans certains pays).

Vers une électrification croissante des usages

Le recours massif à l'usage de l'électricité va être à l'origine de la seconde révolution industrielle. Partout les usages électriques vont se diversifier dans l'industrie, le

⁶ Marcel Deprez «Les grands noms de la houille blanche», Wikipedia.

secteur domestique voire les transports ; les réseaux électriques vont s'étendre dans les villes et sur les territoires. Les interconnexions entre réseaux vont rendre possible le *foisonnement* des puissances. Comme tous les usagers n'utilisent pas en même temps leur puissance souscrite, la puissance totale à installer pourra être inférieure à la somme des puissances individuelles souscrites. On pourra même envisager d'inciter les consommateurs à consommer au moment où la demande est faible, en leur proposant par exemple un prix attractif, et de pénaliser ceux qui soutirent de l'électricité lorsque l'on s'approche de la saturation, en leur appliquant un tarif plus élevé. Si l'on veut rentabiliser l'investissement dans des centrales de grandes dimensions il faut que le *facteur de charge* de ces centrales soit élevé, c'est-à-dire que l'on utilise le plus possible la puissance installée. Comme l'électricité ne se stocke pas, il faut éviter de trop réduire la production de la centrale quand la demande est faible et surtout éviter la *défaillance* lorsque cette demande est forte. Ce qui caractérise la demande d'électricité c'est en effet qu'elle est très variable selon les heures de la journée, les jours du mois et les périodes de l'année. L'offre doit s'adapter instantanément à cette demande et le seul instrument capable de la moduler c'est le tarif que l'on applique au kWh consommé.

Mais le rythme de pénétration de l'électricité va être très variable selon les pays et surtout selon la structure de l'industrie électrique ; la nature juridique des entreprises électriques va également varier beaucoup. On a une coexistence d'entreprises publiques et privées, de sociétés anonymes, d'établissements publics et de coopératives. De ce point de vue la situation n'est pas la même aux États-Unis et en Europe. La structure du *mix électrique*, c'est-à-dire la structure de la production d'électricité, est, elle aussi, très différente d'un pays à l'autre. Cela dépend de l'accès plus ou moins aisé à des ressources nationales ou importées. On peut produire de l'électricité avec des énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole), avec du nucléaire, ou en recourant aux énergies renouvelables (hydraulique, éolien, solaire, biomasse). Cela dépend des technologies disponibles mais aussi et fortement du coût d'utilisation de ces sources d'énergie. De plus les standards techniques sont loin d'être harmonisés puisque les États-Unis ont adopté le 60 Hz contre 50 Hz dans la plupart des autres pays du monde. L'électrification des usages étant au départ plus avancée aux États-Unis qu'en Europe, les Américains vont conserver un réseau en 110 volts tandis que les Européens vont décider d'adopter progressivement un réseau en 220 volts, lequel présente certains avantages. L'alimentation des appareils en 220 volts permet en effet de réduire les pertes lors de la distribution et améliore le rendement des appareils utilisateurs. L'abandon du voltage 110 fut toutefois progressif en Europe ; il faut attendre le milieu des années 1950 en France. On estime qu'il aurait été trop coûteux pour les États-Unis de changer tous les équipements électriques déjà en fonctionnement pour passer du 110 au 220 volts au vu du volume élevé des équipements déjà installés en 110 volts.

L'industrie électrique américaine : un patchwork

Le système américain de production, transport et distribution de l'électricité a toujours été et demeure encore fragmenté ; l'entreprise privée intégrée est la forme dominante. Elle bénéficie d'un monopole local sur une zone géographique bien délimitée mais avec un contrôle strict de l'autorité publique. Il existe aujourd'hui encore plus de 3500 compagnies d'électricité, la plupart ayant le statut d'*Utilities* ce qui veut dire qu'elles bénéficient d'une concession de service public de la part des communes dans lesquelles se fait la desserte. On trouve aussi des entreprises publiques parmi les *Utilities* et un petit nombre d'entreprises fédérales dont la célèbre Tennessee Valley Authority (TVA) créée par Roosevelt et qui demeura longtemps la plus grosse compagnie d'électricité américaine en termes de clients.

Le système fait coexister des compagnies de taille très inégale et il est le fruit d'une évolution historique marquée par le souci du législateur de protéger le petit consommateur. C'est la conséquence du Public Utilities Holding Company Act (PUCHA), loi votée en 1935 à la suite de la faillite de la société de Samuel Insull qui était à l'époque en position dominante, et qui a mis fin à la course à la taille. Cette loi a organisé le démantèlement des monopoles et a interdit aux compagnies d'électricité de sortir de leur métier et de leur territoire. Une société d'électricité ne pouvait pas être présente sur plusieurs États des États-Unis, même par filiales ou participations interposées. Rien n'empêche en revanche ces compagnies de conquérir les marchés étrangers. C'est vrai aussi dans le domaine du pétrole : le Sherman Act de 1890 protège le consommateur américain contre le *pouvoir de monopole* mais encourage indirectement les sociétés américaines à conquérir le monde. Il faudra attendre 1978 et la loi PURPA (Public Utilities Regulation Policy Act) pour que le système soit assoupli avec l'apparition de producteurs indépendants autorisés à produire et à vendre, un peu partout sur le territoire, de l'électricité d'origine renouvelable. C'est surtout le vote par le Congrès de l'Energy Policy Act (EPA) en 1992 qui sera le déclic pour une ouverture à la concurrence. Les sociétés pourront intervenir dans plusieurs États fédérés et la concentration sera autorisée sous réserve qu'elle ne conduise pas à un *abus de position dominante*. La subtilité fondamentale c'est de bien différencier l'*abus* de position dominante de la position dominante. En même temps, le nombre de nouveaux opérateurs, présents dans les renouvelables, va s'accroître fortement, grignotant les parts de marché des opérateurs historiques. L'ouverture à la concurrence s'est faite de façon moins brutale, plus progressive qu'en Europe, exception faite de la Californie, et surtout elle ne concerne pas tous les États de l'Union, certains États, ceux du Middle West en particulier, demeurant largement à l'écart du processus. Là où l'électricité est bon marché (souvent dans des régions où elle est produite avec du charbon extrait à ciel ouvert), la libéralisation est absente et l'ouverture à la concurrence limitée.

Le système électrique américain est doublement régulé du fait du caractère fédéral du pays. Les Publics Utilities Commissions (PUC) présentes dans chaque État fédéré fixent les conditions de desserte et notamment le prix du kWh pratiqué pour le consommateur final domestique. La Federal Energy Regulatory Commission (FERC) a la main sur la régulation inter-États et notamment les réseaux de transport interconnectés. Les deux régulateurs (local et fédéral) sont parfois en désaccord et les conflits de compétences ne sont pas absents. Signalons qu'il existe plusieurs réseaux de grand transport aux États-Unis, sur des zones géographiques de dimensions variables et que ces réseaux ne sont pas tous interconnectés. Le réseau du nord-est des États-Unis est interconnecté avec le Canada, car la région de New York importe beaucoup d'électricité hydraulique en provenance du Québec. La production d'électricité se fait aujourd'hui aux deux-tiers avec du charbon et du gaz naturel, deux ressources dont les États-Unis disposent en grandes quantités, plus faiblement avec du nucléaire ou des renouvelables, mais là encore la situation varie selon les régions. Le pétrole a quasiment disparu de la production d'électricité, à l'instar de ce que l'on observe dans la plupart des pays du monde depuis les chocs pétroliers. Ce n'était évidemment pas le cas durant une grande partie du vingtième siècle. En 2020 la structure de la production américaine d'électricité était la suivante : 38,4 % pour le gaz naturel, 23,3 % pour le charbon, 19,5 % pour le nucléaire et 18,1 % pour les renouvelables (dont 7,2 % pour l'éolien, 6,5 % pour l'hydraulique, 2,6 % pour le solaire et 1,8 % pour la biomasse). Le pétrole représentait moins de 1 % de cette production d'électricité. La part des renouvelables est en progression rapide, celle des centrales à charbon plutôt en déclin d'autant que le gaz tend à se substituer au charbon comme combustible.

Les entreprises américaines pionnières dans l'électricité

La société ComEdison créée par Samuel Insull et qui fut la plus grosse société d'électricité des États-Unis peu de temps après sa création, va renaître de ses cendres après une faillite retentissante en 1932 et retrouver un rôle de producteur et fournisseur d'électricité dans l'Illinois. Après la Seconde Guerre Mondiale elle va se lancer dans l'aventure nucléaire. Elle devient même la principale entreprise de production d'électricité nucléaire des États-Unis (17 réacteurs soit environ 20 % de la production nucléaire). En 2000 elle fusionne avec PECO Energy, une société électrique de Philadelphie elle-même présente dans le nucléaire, pour créer Exelon Corporation⁷. Après la dérégulation des marchés électriques en 1997, Exelon se lance un peu dans le trading mais de façon prudente et privilégie les activités régulées moins risquées. Elle doit cependant perdre une partie de sa clientèle de l'Illinois et de Pennsylvanie au profit des *entrants*, comme le prévoit la législation. En décembre 2004 Exelon annonce son intention de fusionner

⁷ Christophe Defeuilley « Exelon : le retour de l'empire Insull ? », *Flux*, n° 59, 2005.

avec une autre société électrique, la PSEG (Public Service Enterprise Group), ce qui en ferait la plus importante société d'électricité américaine. Les autorités de régulation fédérales (FERC) acceptent mais, devant le refus des autorités locales de régulation du New Jersey, la fusion est annulée en 2005. En 2011 Exelon acquiert les parts d'EDF dans Constellation Energy. En 2015 Exelon fait de nouveau une offre d'acquisition sur une société d'électricité de Washington mais, là encore, le régulateur local refuse malgré l'accord de la FERC. La protection du consommateur n'est pas un vain mot aux États-Unis, une attitude qui on le verra déteindra sur la Commission européenne, de plus en plus obsédée par le risque d'abus de position dominante dans le secteur de l'énergie. Il faut rappeler ici que ComEdison était propriétaire de la centrale nucléaire de Three Mile Island, où s'est produit le 28 mars 1979 l'accident nucléaire le plus grave des États-Unis. Mais Exelon, l'actuel propriétaire, a définitivement arrêté la centrale en septembre 2019, soit plusieurs années avant la date d'échéance de la licence (2034).

La société General Electric (GE) fondée en 1892 par Thomas Edison lors de la fusion entre Edison General Electric Company créée en 1889 et une partie de la Thomson-Houston Electric Company, société spécialisée dans les équipements électriques, va devenir l'un des groupes mondiaux leader dans le domaine de la production d'électricité mais aussi dans la fabrication de tous les équipements liés à l'électricité, que ce soit la construction de centrales, les infrastructures de transport ou les appareils destinés à l'utilisation de l'électricité. C'est une société qui a acquis une compétence particulière dans la construction des turbines à gaz. Ce sera longtemps la seconde capitalisation boursière de Wall Street. Cette société est présente dans 150 pays et contrôle 36 filiales. En 1893 une filiale française sera créée, la Compagnie Française Thomson-Houston, qui deviendra Thomson-Brandt puis Thomson, pour exploiter les brevets de la maison-mère. En juin 1999 GE rachètera à Alstom son département de construction des turbines à gaz, ce qui lui permettra de mettre la main sur l'un des bijoux de la technologie française, la fameuse turbine *Arabelle*. En 2014 GE va acquérir la quasi-totalité de la branche «énergie» d'Alstom, qui ne conservera que sa branche ferroviaire. Pour certains cette vente d'Alstom est un «scandale d'État». Le marché mondial des turbines pour centrales, notamment nucléaires, est dominé par quatre sociétés : Siemens, Mitsubishi, General Electric et Alstom. Le groupe français détient 20% du marché (30% du marché des centrales nucléaires) et a équipé tout le parc nucléaire français. La turbine *Arabelle* est considérée comme la turbine la plus fiable au monde. C'est la façon dont s'est faite cette acquisition qui fait débat aujourd'hui. La justice américaine a exercé une pression sur les dirigeants d'Alstom, en les menaçant de prison, prétextant une affaire relativement modeste de corruption en Indonésie, pour obliger le groupe français à céder ses parts au groupe américain. L'application du droit américain dans des pays étrangers dès qu'un intérêt américain est concerné permet des pressions voire des menaces

qui sont une arme redoutable pour les entreprises américaines vis-à-vis de leurs concurrentes. En l'espèce le gouvernement français de l'époque a laissé faire. Heureusement pour la France, EDF a en 2021 racheté la société qui produit cette turbine et qui équipe d'ailleurs plusieurs réacteurs russes.

La Westinghouse Electric Company, créée en 1886 par George Westinghouse, et qui avait obtenu les droits exclusifs d'exploitation du brevet sur le transport de l'électricité en courant alternatif découvert par Tesla, a ensuite fortement diversifié ses activités en dehors de la seule production et distribution de l'électricité puisqu'elle intervient ou est intervenue aussi bien dans le domaine de l'aéronautique, de l'électronique que dans celui de l'électroménager. Elle dispose notamment d'une branche «défense» importante. Sa principale activité demeure aujourd'hui la conception et la fabrication de réacteurs nucléaires, les réacteurs à eau légère en particulier (dont la France achètera la licence en 1974) mais aussi la gestion du combustible nucléaire. En 2006, suite aux difficultés du nucléaire aux États-Unis, l'entreprise passe sous le contrôle du japonais Toshiba. En 2011 la Nuclear Regulatory Commission (NRC) donne à Westinghouse l'autorisation de développer son nouveau réacteur, l'AP1000, le principal concurrent de l'EPR français. En mars 2017 Westinghouse, avec l'accord de Toshiba, se place sous la protection du chapitre 11 de la loi sur les faillites aux États-Unis dans l'espoir de négocier avec ses créanciers une restructuration de ses dettes. La concurrence du gaz de schiste bon marché a fortement compromis la compétitivité du nucléaire aux États-Unis. En janvier 2018 le fonds d'investissement canadien Brookfield Asset Management rachète Westinghouse pour un peu moins de cinq milliards de dollars.

Les sociétés fondées par Insull, Edison et Westinghouse, avec le concours de Tesla dans ce dernier cas, ont donc connu des parcours différents mais toutes ont survécu à leur fondateur et elles font encore partie du paysage électrique mondial. À côté de ces grosses sociétés historiques il existe de très nombreuses sociétés de production, transport et distribution d'électricité et leur dimension comme leur statut juridique sont très variables selon les États fédérés.

L'industrie électrique européenne : du monopole au marché

En Europe l'évolution de l'industrie électrique fut assez contrastée selon les pays et en tout cas différente de ce que l'on a pu observer aux États-Unis. Ce sont des entreprises privées, souvent de petite taille, qui, comme aux États-Unis, ont été à l'origine du développement des réseaux électriques mais, assez rapidement, les pouvoirs publics ont essayé d'en contrôler l'extension et d'entrer dans leur capital. Après la Seconde Guerre Mondiale, le secteur public a pris le relais du privé un peu partout, et il faudra attendre la fin des années 1990 avec le processus de libéralisation, de dérégulation et de privatisation pour voir apparaître de

nouveaux acteurs, souvent privés, dans un secteur où traditionnellement dominait l'entreprise publique intégrée. De nombreux pays ont eu recours à la nationalisation (France, Angleterre, Italie). Dans d'autres pays ce sont davantage les communes ou les régions qui vont s'impliquer dans la production et la distribution de l'électricité. C'est le cas en Allemagne avec les Stadtwerke. La France est un bon exemple de cette évolution.

L'accès à l'électricité sera au départ réservé à des clients plutôt fortunés qui, dans certains quartiers comme à Paris, se brancheront sur le réseau local construit par quelques entrepreneurs privés audacieux, avec la permission des autorités publiques. Certains industriels se lanceront dans la production d'électricité pour leurs besoins propres, comme ce sera le cas dans les Alpes où le potentiel hydraulique est important. De petits barrages produiront la *bouille blanche* destinée à alimenter les usines de pâte à papier ou des installations d'électrometallurgie. Les communes vont rapidement s'intéresser à cette nouvelle forme d'énergie qui peut remplacer de façon avantageuse l'éclairage au gaz des rues. La sécurité publique sera mieux assurée avec cette énergie beaucoup plus lumineuse. Mais elles vont se heurter en France à un obstacle juridique : la loi Le Chapelier.

La loi Le Chapelier du 14 juin 1791 interdit les corporations en France et proclame la liberté du commerce et de l'industrie et elle empêche les collectivités locales de développer des activités marchandes. Il leur faudra faire appel au secteur privé dans le cadre de la permission de voirie ou de la concession de service public si elles souhaitent développer les réseaux électriques⁸. Un contrat de concession est un contrat passé entre une autorité concédante, la commune notamment, et un concessionnaire, en général une société privée, lequel autorise ce concessionnaire à construire et entretenir, à ses risques et périls, une infrastructure (un réseau électrique par exemple) pour alimenter des clients, et à se rémunérer *via* des tarifs qui seront fixés ou contrôlés par le concédant. Le contrat est signé pour une période suffisamment longue pour permettre au concessionnaire de couvrir ses coûts et d'obtenir une rémunération ; c'est souvent 30 ans, parfois 50 ans et rarement plus, mais on trouve des contrats de 99 ans. Un cahier des charges, annexé au contrat, prévoit toutes ces modalités pratiques. Ce contrat de concession doit respecter les trois grands principes du service public prévus par le droit administratif : la continuité du service, l'égalité de traitement des usagers et l'adaptabilité au progrès technique. Seule la *force majeure* exonère les parties de leurs engagements mais le concédant peut mettre fin au contrat en cas de faute grave du concessionnaire. C'est dans ce cadre que seront organisés en France les services publics à caractère industriel et commercial, comme la distribution de l'électricité, de l'eau, du gaz, des transports urbains.

8 Jean-Pierre Hansen et Jacques Percebois « Transitions électriques... » *op.cit.*

L'envolée des prix de l'électricité observée en 2022 a conduit la Commission européenne à envisager une réforme profonde du mécanisme de formation de ces prix. Comment sont fixés ces prix aujourd'hui en France et en Europe ? Selon quel processus et par qui ?

Si une partie du prix de l'électricité est fixée sur un marché de gros, heure par heure, son niveau dépendant de plusieurs facteurs (activité économique, température, prix du gaz et du carbone, aléas techniques du parc de production), une autre partie est régulée et doit couvrir le coût des réseaux électriques de transport et de distribution.

Cet ouvrage présente les divers concepts de coûts (coût moyen, coût marginal), jouant un rôle dans le choix des investissements et dans l'appel des centrales sur le réseau. Il retrace les grandes étapes de l'industrie électrique mondiale et accorde une place importante à l'énergie nucléaire, dans un contexte de décarbonation du mix énergétique.

Fruit de nombreuses années d'enseignement à l'École des Mines de Paris, à l'IFP-EN et à l'Université de Montpellier, cet ouvrage s'adresse aux élèves ingénieurs, aux étudiants, aux chercheurs et aux professionnels du monde de l'industrie.

Jacques Percebois est professeur émérite à l'Université de Montpellier, où il a créé un master en économie de l'énergie et un centre de recherche (le CREDEN). Il enseigne également à l'École des Mines de Paris et à l'IFP-EN. Il a été membre de plusieurs conseils de sociétés énergétiques (Gaz de France, GRT-Gaz, Framatome) et de plusieurs commissions nationales (Champsaur, CNE2, Énergies 2050, qu'il a présidée). Il est l'auteur de nombreux ouvrages et articles scientifiques.

20 euros

