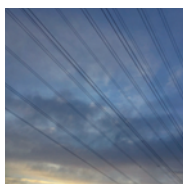


LES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES DE DEMAIN



Un défi pour la transition énergétique

Les systèmes électriques de demain

Un défi pour la transition énergétique

Lavoisier
TEC & DOC

editions.lavoisier.fr

Images de couverture :

Sandrine Boisleux
Claire Buisson
Sullyvan Compte
Sandrine Dyèvre
Eloïse Huard
Céline Laporte

Contributeurs

Cet ouvrage est le fruit d'un travail collaboratif de 23 chercheurs d'EDF spécialistes du domaine. Il se veut le reflet pédagogique de leur savoir et expérience.

Véronique Beillan

Véronique Beillan, diplômée en socio-anthropologie de l'université Sorbonne Paris V-René Descartes, est ingénieur-chercheur expert à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Ses travaux portent sur les pratiques domestiques, les usages sociaux de l'énergie et l'innovation, en particulier, la production d'énergie décentralisée et la gestion dynamique de la demande en lien avec les Smart Grids. Elle a été impliquée dans les projets européens Grid4EU et CityOpt sur les Smart Cities. Elle a également été engagée, dans le cadre de projets collaboratifs, dans des travaux de prospective des modes de vie et de la demande énergétique.

Caroline Bono

Caroline Bono a piloté, au sein d'EDF, plusieurs analyses stratégiques sur le système électrique français et européen dans un contexte d'intégration massive d'énergies renouvelables. Elle participe actuellement au projet H2020 EU-SysFLEX. Elle a débuté sa carrière au Lawrence Berkeley National Laboratory puis au Lawrence Livermore National Laboratory dans le développement de méthodes numériques. Caroline est titulaire d'un PhD en Mechanical Engineering and Scientific Computing de l'University of Michigan (2002), d'un Master of Science en Mechanical Engineering de l'University of Michigan (1999), et d'un diplôme d'ingénieur de l'ENSTA (1999).

Sophie Bouly De Lesdain

Docteur en anthropologie sociale, Sophie Bouly de Lesdain est chercheur expert à EDF et membre associée du LAU (IIAC/CNRS-EHESS), après avoir été Senior member à l'université d'Oxford. Elle a mené des

recherches anthropologiques au Cameroun, au Sénégal et en France. Elle se consacre depuis une dizaine d'années à l'étude de la production et de la consommation énergétiques par les ménages. Ses recherches s'inscrivent dans une anthropologie économique, l'anthropologie urbaine, de l'énergie et de l'environnement. Elle a enseigné plusieurs années à la Sorbonne et publié de nombreux articles dans des revues de référence.

Fabien Bricault

Fabien Bricault occupe les fonctions de chargé d'étude économique et de chef de projet à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Il est diplômé de l'Université Paris-Saclay en Économie de l'Innovation et des Réseaux. Depuis 2007 à la R&D d'EDF, ses travaux couvrent l'analyse stratégique et la définition de modèles économiques pour l'entreprise, spécifiquement pour l'intégration des Smart Grids et du stockage de l'énergie. Il a participé à plusieurs chantiers externes dont le plan Réseaux Électriques Intelligents. Il est également enseignant rattaché à l'Université Paris-Saclay (Master Ingénierie de l'Innovation) sur les questions d'analyse stratégique.

Alain Burtin

Alain BURTIN est directeur des Programmes Management d'Énergie à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Il est diplômé de l'École Nationale des Ponts & Chaussées et a un DEA en Intelligence Artificielle. Il a rejoint la R&D d'EDF en 2007 après un parcours aux Études Économiques Générales, à la Direction Internationale, au pôle Industrie et à la direction Optimisation Trading. Dans le cadre du développement du groupe EDF et comme consultant pour des sociétés d'électricité étrangères, il a acquis une large expérience des systèmes et marchés électriques en France, en Europe et à l'international.

Julien Callec

Julien Callec est ingénieur chercheur à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Diplômé de Télécom SudParis et de Mines Paris-Tech, il a rejoint EDF après avoir travaillé chez Accenture puis enseigné les mathématiques. Il travaille actuellement sur la stabilité des systèmes électriques, l'intégration des énergies renouvelables et le pilotage des nouveaux moyens de régulation (dispositifs de stockage ou sources de production renouvelable).

Mathieu Caujolle

Mathieu Caujolle est ingénieur en Génie Électrique diplômé de l'INSA Lyon et titulaire d'un doctorat en Électrotechnique et Traitement du Signal de CentraleSupélec. Il a intégré la Direction Recherche et Développement d'EDF en 2011, et y travaille depuis sur différents sujets tels que l'optimisation du fonctionnement des réseaux de distribution, les pro-

tections, la qualité de l'électricité et la simulation à grande échelle. Il a été impliqué dans plus démonstrateurs Français (VENTEEA, SOGRID) et projets Européens (ADDRESS, evolVDSO). Il est actuellement chef d'un projet sur la planification et le développement des réseaux de distribution, et un membre actif du Comité Système traitant des problématiques de Courant Continu Basse Tension (SyC LVDC) à l'IEC.

Jean-Michel Cayla

Jean-Michel Cayla est chef de projet de recherche à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Ses activités de recherche s'intéressent principalement à la compréhension des déterminants (techniques, économiques, sociologiques, réglementaires) de la demande de services énergétiques et à leurs possibles évolutions à long-terme. Elles s'appuient pour cela sur le développement et l'analyse de modèles de prospective et de scénarios énergétiques en lien avec les enjeux climatiques et la transition énergétique, en collaboration avec le milieu académique. Jean-Michel a un doctorat en économie et finances de l'école des Mines de Paris (2011), un Mastère spécialisé en optimisation des systèmes énergétiques (2007) de l'école des Mines de Paris et un diplômé d'ingénieur (2007) de l'ESPCI.

Valentin Costan

Valentin Costan est docteur en génie électrique de l'Institut National Polytechnique de Toulouse depuis 2007. Il a intégré la Direction Recherche et Développement d'EDF en 2009 en tant qu'ingénieur chercheur. Ses activités de recherche portent sur l'analyse dynamique des systèmes comportant des machines synchrones et des dispositifs à base d'électronique de puissance.

Sylvie Douzou

Sylvie Douzou, est chercheuse sénior en sociologie de l'énergie au sein de la Direction Recherche et Développement d'EDF qu'elle a rejoint en 2002, après avoir travaillé une dizaine d'années dans le secteur de l'enseignement et de la recherche au Québec, puis dans le secteur privé en France. Elle est diplômée de l'Université de Montréal. Elle a contribué à de nombreux projets collaboratifs visant à analyser, à différentes échelles, les diverses dimensions de la demande en énergie en lien avec les dynamiques sociétales. Elle est directrice associée du centre de recherche britannique DEMAND (Dynamics of Energy, Mobility and Demand).

Floriane Fesquet

Floriane Fesquet est responsable du programme « Prospective Énergétique et Modèles d'Activités » au sein de la Direction Recherche et Développement d'EDF, après avoir animé des projets sur les évolutions

à long terme du système énergétique européen, et sur l'analyse stratégique et financière des acteurs du secteur électrique. Elle est diplômée de l'École Centrale Paris.

Timothée Hinchliffe

Timothée Hinchliffe travaille sur l'économie du stockage d'énergie à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Ses champs de recherches portent sur l'évaluation des besoins en stockage par l'analyse des différents services fournis et la prise en compte de la compétition / complémentarité avec les autres moyens de flexibilité (interconnexions, flexibilité de la production, etc.). Timothée est diplômé de l'école Supélec.

Dominique Lafond

Dominique Lafond est chef de projet à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Elle est diplômée de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Embauchée à la R&D d'EDF en 1997, depuis 2009 elle travaille sur la modélisation des systèmes énergétiques européens et français et les potentiels technico-économiques de décarbonation de ces systèmes.

Xavier Legrand

Xavier Legrand est ingénieur INSA de Lyon et docteur de l'École Centrale de Lyon. Il a intégré la Direction Recherche et Développement d'EDF en 2005 pour travailler sur des activités en lien avec les transitoires électromagnétiques (type écoulement de courants de foudre). Il a en particulier animé un projet de recherche dédié à l'outil de calcul EMTP-RV, puis un autre portant sur le raccordement des moyens de production et leurs interactions avec les réseaux. Il est aujourd'hui chef de groupe sur la thématique du fonctionnement des systèmes électriques.

Christiane Legris-Desportes

Christiane Legris-Desportes, co-pilote d'un projet de veille sur l'environnement externe d'EDF et sur les risques sociétaux, est expert sémiologue et sociolinguiste (Université Paris 7 et Paris 12). Après une activité d'enseignement et de recherche, elle a rejoint dans les années 1990 la Direction Recherche et Développement d'EDF. Elle y réalise et encadre depuis plus d'une vingtaine d'années des recherches en sciences humaines et sociales, et s'est spécialisée dans l'analyse des signaux faibles et la détection de l'émergent sociétal. En collaboration avec l'université Paris 7, elle a initié les premiers colloques internationaux de sémiologie appliquée à l'entreprise. Chercheure associée au CeReS (Centre de Recherches Sémiotiques), elle est également chargée d'enseignement universitaire. Après avoir dirigé pendant 7 ans une

collection en sciences humaines et sociales dans une maison d'édition indépendante, elle a créé la collection Dynamiques Contemporaines aux Editions Academia.

Miguel Lopez-Botet Zulueta

Miguel Lopez-Botet est analyste à la Direction de la Stratégie d'EDF depuis 2016. Il a débuté sa carrière à la Direction Recherche et Développement d'EDF en 2011 en tant que responsable d'un projet sur l'analyse des systèmes électriques du futur. Ses principaux champs de recherche ont porté sur la planification des investissements, la gestion des systèmes électriques, l'intégration des énergies renouvelables et la valeur des différentes sources de flexibilité. Miguel est diplômé de l'ENSTA ParisTech et de l'Universidad Politécnica de Madrid. Il est aussi titulaire d'un master de l'École des mines de Paris sur l'optimisation des systèmes électriques.

John McDonald

Depuis 2015, John McDonald est chef d'un groupe dont la thématique est la fiabilité et la disponibilité des réseaux électriques à La Direction Recherche et Développement d'EDF. Après avoir rejoint EDF en 2009, il a piloté et travaillé dans plusieurs projets autour de la gestion des actifs, la fiabilité des réseaux électriques et surtout la caractérisation des risques liés à l'utilisation croissant des « TIC » (Technologies de l'Information et de la Communication) dans le réseau électrique de distribution. De 2005 à 2009, il a effectué un postdoc à Imperial College London sur les méthodes d'évaluation de la fiabilité et des risques appliqués à l'exploitation des réseaux de distribution. Il a également développé et utilisé des outils de simulation Monte Carlo pour examiner le comportement des réseaux. De 2000 à 2004, il a réalisé un doctorat en génie électrique à l'University of Queensland en Australie, où il a étudié l'impact de la conception des générateurs électriques sur les performances des réseaux électriques en situation de défaut.

Etienne Monnot

Etienne Monnot est diplômé de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Électricien de Grenoble (ENSIEG). Il a rejoint EDF en 1991 où il a débuté sa carrière au Centre National des Mouvements d'Énergie (CNME) jusqu'en 1999 pour travailler sur le maintien en condition opérationnel des outils de conduite. Ensuite il a œuvré au Centre National d'Équipement Nucléaire (CNEN) pendant cinq ans sur la distribution électrique des paliers N4 et EPR. Il a rejoint la Direction Recherche et Développement d'EDF en octobre 2004 pour mener différents projets de recherche. Il est ingénieur expert sur le fonctionnement des systèmes électriques en particuliers dans les domaines des réglages de tension et de fréquence et de la stabilité des alternateurs.

Emmanuel Neau

Diplômé en Électrotechnique à l'ENSEEIH de Toulouse, Emmanuel Neau a débuté à EDF-GDF Services (désormais ENEDIS) en 1998 pour s'occuper de la planification des réseaux HTA du département de la Gironde, avant de rejoindre la Direction Recherche et Développement d'EDF pour piloter un projet de système d'information pour la supervision du génie civil des ouvrages et des ressources en eaux du producteur. Ensuite, pendant 15 années passées à RTE, il a développé son expertise sur l'exploitation du réseau de transport et le fonctionnement du système électrique et des marchés, notamment sur l'équilibre offre-demande, l'intégration des énergies renouvelables et des véhicules électriques. En 2017, de retour à la R&D d'EDF, il pilote en tant que chef de projet des activités de recherches autour des interactions locales-globales et de l'évolution du système électrique.

Magali Pierre

Formée à la sociologie et à l'anthropologie à l'Université Paris V – René Descartes, Magali Pierre travaille depuis 2001 au sein de la Direction Recherche et Développement d'EDF, dans un département tourné vers des problématiques commerciales. À la croisée des questions de mobilité, d'usage de l'énergie et d'innovations techniques, ses recherches portent sur l'appropriation du véhicule électrique et l'utilisation des points de recharge.

Grégoire Prime

Grégoire Prime est ingénieur à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Depuis 2009, il travaille sur les défis technico-économiques liés aux développements des énergies renouvelables dans nos systèmes électriques. Il pilote actuellement un projet de recherche visant à étudier au long terme la problématique de la stabilité de ces systèmes électriques dans un contexte de profonde évolution. Il est diplômé de l'ENSTA, ParisTech.

Vera Silva

Vera Silva est le responsable du programme « Systèmes et marchés électriques » à la R&D d'EDF. Après avoir rejoint EDF, en 2009, elle a notamment piloté l'étude « Analyse technique et économique du système électrique Européen avec 60 % EnR », coordonné le montage du projet H2020 – EU SysFlex et piloté le projet européen FP7 Grid-4-Vehicles. Avant 2009 elle a travaillé au Royaume-Uni, à l'Imperial College London et à l'Université de Manchester, où elle a contribué à des études techniques pour le ministère *Department of Energy and Climate Change* et piloté des projets de recherche appliquée (EDF Energy, E-On) et des projets Européens. Elle a débuté sa carrière au Portugal à l'Institut Poly-

technique de Porto ou elle a été maître de conférences et chercheuse dans le domaine de l'application de l'intelligence artificielle au système électriques pour le compte d'EDP Distribuição. Vera a un doctorat de l'Imperial College London (2010), un Master 2 (2003) et un diplômé d'ingénieur (1999) de l'Université de Porto. Elle est membre de l'Advisory board de IEA et de la IEA Task 25 – Wind integration.

Marc Trotignon

Marc Trotignon est Expert Groupe, Ingénieur Sénior et Economiste au sein de la Direction Recherche et Développement. Il a 39 ans d'expérience dans le domaine de la gestion technico-économique des systèmes électriques. Il travaille actuellement sur l'adaptation de l'organisation et du fonctionnement des marchés électriques rendus nécessaires notamment par l'introduction massive des énergies décentralisées et renouvelables. Il organise régulièrement des sessions de formation sur le sujet des marchés électriques, et est l'auteur d'un MOOC (Massive Open Online Course) interne à EDF sur ce thème. Il est diplômé de l'École Centrale Paris.

Table des matières

Contributeurs	III
1. Introduction	1
2. L'électricité dans nos vies	3
2.1. Rétrospective.....	3
2.1.1. <i>De la fée électricité à l'électricité invisible</i>	3
2.1.2. <i>Analyse rétrospective de la consommation d'énergie et des usages de l'électricité</i>	7
2.2. Aujourd'hui et demain	15
2.2.1. <i>L'arrivée du numérique dans notre quotidien</i>	16
2.2.2. <i>Économie de partage et pratiques collaboratives</i>	22
2.2.3. <i>Quand le consommateur devient producteur</i>	24
2.2.4. <i>L'électricité au service de la décarbonation de l'économie</i>	29
2.3. Une énergie au cœur de multiples enjeux à plusieurs mailles	35
3. Le système électrique	39
3.1. La consommation	40
3.2. La production	48
3.2.1. <i>Le principe de production d'énergie électrique</i>	48
3.2.2. <i>Les centrales de production</i>	49
3.3. Le réseau	61
3.3.1. <i>Le lien physique entre production et consommation</i>	61
3.3.2. <i>Les grandeurs et lois fondamentales du réseau électrique</i>	61
3.3.3. <i>Un peu d'histoire</i>	64
3.3.4. <i>Une architecture à plusieurs étages</i>	66

3.3.5. Le réseau de transport	67
3.3.6. Le réseau de distribution.....	70
3.4. Un système à piloter finement	74
3.4.1. Avant tout, une histoire d'équilibre en temps réel.....	74
3.4.2. Le réglage de la fréquence.....	75
3.4.3. L'équilibre prévisionnel à court terme	79
3.4.4. Assurer la sécurité en permanence.....	81
3.5. Un système qui doit rester stable malgré les aléas	87
3.5.1. La stabilité angulaire des alternateurs	89
3.6. Une anticipation nécessaire plusieurs années à l'avance .	91
3.7. Un système sur lequel interviennent de nombreux acteurs	94
3.7.1. Acteurs et marchés.....	94
3.7.2. Le Mécanisme d'Ajustement et le rôle de Responsable d'Équilibre.....	96
3.7.3. Le mécanisme de formation des prix de l'électricité.....	98
3.7.4. Quelques architectures de marché en Europe.....	103
3.8. Les transformations du SE	105
3.8.1. Des transformations passées.....	105
3.8.2. ... à celles à venir.....	106
4. Les enjeux de l'équilibre offre-demande et du fonctionnement du système.....	109
4.1. Les enjeux de l'insertion des EnRV	110
4.1.1. Les implications de leur variabilité et de leur incertitude.....	111
4.1.2. Les implications de la nature décentralisée des installations de production.....	116
4.1.3. Les implications du mode de raccordement des EnRV	117
4.2. Les enjeux de la flexibilité.....	117
4.2.1. Les dimensions temporelle et géographique de la flexibilité.....	120
4.2.2. La transformation du système et ses implications pour la flexibilité.....	122
4.3. Les enjeux du fonctionnement et de la résilience du système électrique.....	124
4.3.1. Des hypothèses de base remises en question.....	125
4.3.2. Un fonctionnement à repenser avec son lot de défis et d'opportunités.....	126
4.3.3. La sécurisation des REI	127
4.4. Un système en cours de transformation.....	128

5. La flexibilité et les évolutions du <i>market design</i> associées	129
5.1. Le développement des EnR variables et des flexibilités décentralisées	130
5.1.1. <i>Le renforcement de la maille européenne</i>	131
5.1.2. <i>Le développement des flexibilités décentralisées et la gestion des réseaux</i>	133
5.2. Les challenges de la flexibilité pour l'EOD	139
5.2.1. <i>Les besoins de marges de sécurité et de flexibilité infra-journalière</i>	141
5.2.2. <i>La flexibilité et les réglages de la fréquence</i>	147
5.3. Une palette de leviers pour répondre aux besoins croissants de flexibilité	150
5.3.1. <i>Les moyens de production conventionnels</i>	151
5.3.2. <i>La production renouvelable variable</i>	154
5.3.3. <i>Le stockage</i>	155
5.3.4. <i>La flexibilité de la demande, le véhicule électrique et le Power2X</i>	157
5.4. Les enjeux de la valorisation de la flexibilité	166
5.4.1. <i>L'évaluation économique des leviers de flexibilité</i>	166
5.4.2. <i>Les implications du market design pour le développement des flexibilités</i>	167
5.4.3. <i>Les nouveaux produits en lien avec la flexibilité</i>	168
5.5. Nouveaux concepts et approches de développement des services de flexibilité	171
6. Fonctionnement dynamique du système électrique : ruptures et solutions émergentes	175
6.1. Inertie et réglages de fréquence	177
6.1.1. <i>Baisse de l'inertie : dégradation de la propriété naturelle à s'opposer aux variations de fréquence</i>	177
6.1.2. <i>Vers des réserves plus rapides ?</i>	183
6.1.3. <i>Et pour la réponse « avant réglage »</i>	185
6.2. Plan de protection, puissance de court-circuit et fonctionnement des protections	186
6.2.1. <i>Plan de protection du système électrique</i>	186
6.2.2. <i>La puissance de court-circuit et les sources interfacées par de l'EP</i>	187
6.2.3. <i>Focus sur les protections</i>	188
6.3. Les enjeux autour des perturbations harmoniques et fréquentielles	191
6.3.1. <i>Perturbations harmoniques</i>	192
6.3.2. <i>Perturbations fréquentielles de 2 à 150 kHz</i>	192

6.3.3. <i>Des sources de perturbation de plus en plus complexes</i>	194
6.4. Les défis d'un système piloté par les onduleurs	194
6.4.1. <i>Problématique</i>	194
6.4.2. <i>Stratégie de pilotage des onduleurs : « suivre » ou « former » le réseau ?</i>	195
6.4.3. <i>Système orchestré par l'électronique de puissance, quelles performances et défis ?</i>	197
6.4.4. <i>Comparaison avec les microréseaux</i>	198
6.4.5. <i>Système dominé par l'électronique de puissance : problèmes de stabilité</i>	200
6.5. Zoom sur le fonctionnement dynamique des systèmes électriques insulaires	201
6.5.1. <i>Les systèmes électriques insulaires</i>	201
6.5.2. <i>Spécificités intrinsèques des SEI</i>	201
6.5.3. <i>La gestion actuelle des SEI français et la politique de sûreté</i>	203
6.5.4. <i>L'intégration des EnRV dans les SEI français</i>	203
6.6. Un challenge pour l'avenir	205
6.6.1. <i>Des solutions pour faciliter le fonctionnement du système de demain</i>	205
7. Conclusion	209
Glossaire	215

Introduction

L'électricité fait partie de notre quotidien, elle est au cœur de la société et des activités économiques. Celle qui a été considérée à l'origine comme la « fée » électricité tend à devenir une commodité banale qui s'échange sur les marchés. Il suffit cependant d'un épisode climatique et d'une coupure d'alimentation pour que nous prenions conscience de la place et de l'importance que l'électricité a prises dans nos vies. L'électricité ne se stocke pas et doit être produite au moment où elle est consommée. Derrière ce miracle renouvelé à chaque instant se cache le plus grand système industriel développé par l'homme : le système électrique (SE) !

L'objectif de ce livre est de faire découvrir au lecteur l'envers du décor du SE (comment ça marche) et les défis auxquels il va devoir faire face pour s'adapter aux enjeux de demain : dans le contexte de la transition énergétique et de la révolution numérique, l'électricité est appelée à jouer un rôle essentiel pour faire face aux challenges du xxi^e siècle.

Avant d'aborder le fonctionnement à proprement parler du SE, il nous a paru important dans un premier temps de remettre en perspective l'évolution des usages de l'électricité : au cours des cinquante dernières années, la part de l'électricité dans le bilan énergétique de la France est passée de 5 % en 1970 à plus de 25 % en 2015. Cette part est sans aucun doute appelée à croître dans les années à venir avec le développement de l'électricité dans la mobilité, en support du développement du numérique dans l'ensemble de l'économie, ou encore sous la forme de solutions performantes et flexibles pour le confort dans les bâtiments. Dans la perspective de lutte contre le changement climatique, le développement des usages performants de l'électricité, adossé à des sources de production d'électricité décarbonées, constitue un levier de premier plan.

Le SE et son fonctionnement sont présentés dans un second temps : on illustre le bénéfice du foisonnement entre l'offre et la demande à l'échelle du SE, les aléas auxquels les acteurs du système électrique ont à faire face, les problématiques de gestion de l'équilibre offre-demande (EOD) aux différents horizons de temps, les principes sur lesquels repose le pilotage du système en temps réel (réglage de fréquence, réglage de tension, stabilité angulaire), les mesures et dispositifs nécessaires pour assurer la protection du système en permanence.

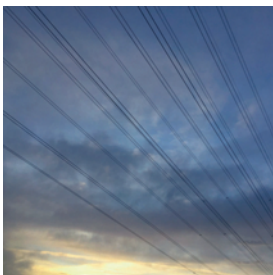
Le troisième temps du livre vise à expliciter les enjeux d'adaptation du SE et des marchés de l'électricité pour faire face à la montée en puissance de sources de production renouvelables variables, tel que l'éolien et le photovoltaïque (PV), et au-delà à l'hybridation croissante entre des sources de courant alternatif et continu dans les SE.

Ce livre a été rédigé par des ingénieurs et chercheurs, on l'espère avec un effort de pédagogie pour le rendre accessible à tous, sans toutefois trahir la rigueur scientifique. Il se veut une ouverture vers la complexité...

Remerciements à l'ensemble des contributeurs :

Cet ouvrage est le fruit d'un travail collaboratif et collectif de 23 ingénieurs chercheurs d'EDF spécialistes dont les profils ont été présentés au début de l'ouvrage.

Sa rédaction a été coordonnée par Alain Burtin, Jean-Paul Chabard, Sandrine Dyèvre, Floriane Fesquet, Xavier Legrand, Francois Molho, Salomé Kradaoui, Emmanuel Neau, Bernard Salha et Vera Silva.



Le développement des énergies renouvelables, l'émergence des systèmes énergétiques locaux, l'autoproduction, l'autoconsommation, le stockage de l'électricité, les nouveaux usages, etc. sont autant de mutations qui nécessitent de développer des leviers de flexibilité au sein du système électrique.

Ce dernier, en pleine évolution, est au cœur de la transition énergétique et de la lutte contre le réchauffement climatique. Cet ouvrage est indispensable pour comprendre le fonctionnement de l'un des plus grands systèmes industriels au monde, et pour mieux appréhender les grands enjeux à relever par la société et les acteurs du secteur de l'énergie.

