

Préface

La transition énergétique est désormais une réalité en France, en Europe et dans le monde. Celle-ci répond aux objectifs de protection de l'environnement qui imposent de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de préserver les ressources naturelles, à la volonté des pays de sécuriser leurs approvisionnements et aux aspirations des citoyens en matière de « destin énergétique » qui orientent notamment vers des solutions privilégiant les circuits courts, avec autant que possible des productions au plus près des consommateurs. Les accords internationaux, notamment l'accord de Kyoto en 1997, puis l'accord de Paris faisant suite à la COP 21 de 2015, ainsi que les décisions de l'Union européenne, comme le Green Deal, viennent préciser les objectifs et les mesures à prendre. Tout cela conduit à de profondes transformations du paysage énergétique et à des évolutions importantes des systèmes électriques. Les énergies renouvelables (EnR), principalement éoliennes et photovoltaïques, se développent rapidement. Il en est de même des solutions décarbonées au niveau des usages, comme les véhicules électriques ou les pompes à chaleur. Les systèmes de stockage décentralisés apparaissent. Des logiques locales se développent avec l'autoconsommation ou les communautés énergétiques. Enfin, le soutien à la filière hydrogène ouvre des perspectives complémentaires.

L'intégration des EnR et la charge des véhicules électriques imposent aux opérateurs de réseaux de développer des solutions nouvelles. Les centrales EnR ont en effet des caractéristiques différentes des centrales de production utilisées précédemment : elles sont décentralisées et leur production est intermittente. Et la charge des véhicules électriques diffère des autres consommations car elle ne s'effectue pas toujours au même endroit et nécessite, potentiellement, une puissance élevée. Comme la plupart des centrales EnR (plus de 90 % en France) et comme évidemment l'ensemble des bornes de recharge de véhicules électriques sont connectées aux réseaux de distribution, la gestion de ceux-ci doit se transformer en profondeur.

Une gestion plus intelligente, plus dynamique, plus flexible des systèmes de distribution s'impose. Il faut notamment prévoir les productions et les consommations, développer l'observabilité et les capacités de détection des congestions, pouvoir ajuster rapidement les injections, les soutirages ou les schémas de réseaux, faire évoluer les dispositifs de réglage de la tension, les automates et les systèmes de protection.

Les réseaux électriques de distribution, dans le cadre de leur mission de service public, ont un rôle fondamental pour faciliter l'atteinte des objectifs de la transition énergétique dans les meilleures conditions d'économie, de sécurité et de qualité d'alimentation. Ils pourront le jouer pleinement à condition que des solutions innovantes soient conçues, industrialisées et déployées. Le déploiement des compteurs communicants, la transformation numérique, les progrès de l'intelligence artificielle ouvrent des perspectives d'amélioration majeures au service de ces ambitions.

Les défis sont de taille, car il ne faut pas oublier que le système électrique est généralement considéré comme le système le plus complexe jamais construit par l'homme : il est de grande dimension, composé de millions de kilomètres de lignes et câbles avec des ramifications qui vont du local à l'international, une superposition de plusieurs niveaux de tension, des possibilités de reconfiguration nombreuses, un dispositif de supervision et de protection complexe. Et c'est une infrastructure vitale, essentielle pour le fonctionnement de nos sociétés modernes, dont il convient de garantir l'intégrité en toutes circonstances.

La planification des réseaux de distribution est une étape-clé dans leur gestion. Les enjeux sont importants : une étude récente menée avec les associations européennes des gestionnaires de réseaux de distribution estime que les besoins d'investissements pour les réseaux des pays de l'Union européenne et du Royaume-Uni s'élèvent à environ 400 milliards d'euros sur la période 2020-2030. Une planification efficace est donc indispensable pour allouer de façon optimale les moyens considérables qui doivent être mobilisés.

Le changement de paradigme impliqué par la transition énergétique impose de renouveler les méthodes de planification des réseaux de distribution. En effet, les modèles traditionnels ont atteint leurs limites et doivent être adaptés pour prendre en compte un nombre croissant d'incertitudes, intégrer des leviers de flexibilité et notamment les moyens de stockage décentralisés, tirer parti des gros volumes de données collectées ou encore simuler l'apport d'une intelligence accrue et distribuée. Par ailleurs, des modèles spécifiques doivent être imaginés avec l'émergence du concept de *microgrid*, la création de communautés énergétiques et le développement des réseaux multi-énergies. Il faut aussi considérer l'apparition possible de réseaux à courant continu ou hybrides.

Cet ouvrage a donc pour ambition de traiter les défis de la planification des réseaux de distribution qui doivent faciliter la décarbonation des systèmes énergétiques, répondre

aux nouvelles attentes des citoyens et des différents utilisateurs, créer de la valeur pour l'ensemble d'entre eux, tout en continuant à garantir la qualité et la résilience de l'alimentation en électricité.

Après une introduction générale sur les réseaux électriques et leur fonctionnement, les principes fondamentaux de la planification des réseaux de distribution y sont décrits. Ensuite, l'impact de l'introduction des ressources d'énergie décentralisées sur les modèles de planification y est expliqué avec une présentation des différentes solutions possibles, suivie de quelques études de cas d'usage permettant de mieux appréhender les évolutions des modèles. L'ouvrage se poursuit par un exposé de la modélisation mathématique du problème et des méthodes de résolution possibles et détaille les algorithmes de résolution sur les cas étudiés. Enfin, la dernière partie de ce livre est consacrée aux nouvelles tendances et aux concepts émergents tels que le couplage des outils de planification et d'exploitation, les solutions logicielles centrées sur la donnée, les architectures de réseaux permises par le courant continu, les approches multi-objectifs et multisectorielles ou encore la multiplication des acteurs et de leurs interactions.

C'est un ouvrage riche et d'actualité. Il est à destination de l'ensemble des acteurs du domaine, qu'ils soient décideurs, ingénieurs, chercheurs, enseignants ou étudiants. Bonne lecture !

Nouredine HADJSAID
G2Elab, Grenoble INP, Grenoble
Pierre MALLET
Enedis, Paris

Introduction

Le premier réseau électrique est apparu en 1882, lorsque Edison met en service le réseau d'éclairage public d'un district de New York. Au fur et à mesure des découvertes et avancées technologiques, le réseau électrique a poursuivi son développement d'électrification mondiale, mais avec, à ce jour, encore presque un milliard de personnes sans accès à l'électricité en 2017¹. Chaque pays a développé des règles de planification pour ses réseaux suivant un cadre technique et réglementaire dépendant de son histoire, de ses spécificités géographiques, du contexte socio-économique et également politique. Dans la majorité des cas, l'électricité est produite à partir de centrales de forte puissance pour la plupart polluantes (64 % de la production mondiale étant à base de thermique à flamme)². Elle est ensuite exportée vers les zones de consommation grâce au réseau électrique de transport et de distribution. Les définitions et rôles des secteurs de la production, du transport, de la distribution et de la consommation étaient clairement définis et les solutions appliquées pour le développement des réseaux étaient fondées sur des optimisations technico-économiques des investissements de l'ensemble de la chaîne. Depuis quelques années, ce paysage électrique très structuré devient plus flou car il est au cœur de la transition énergétique et sociétale, du développement durable, des évolutions technologiques et de la dérégulation. Les règles de fonctionnement et d'investissement doivent être revues pour suivre et soutenir ces évolutions. Nous pouvons citer de manière non exhaustive, la multiplication de productions de petites puissances en général renouvelables et intermittentes (à partir du kW, voire du W dans certaines régions non électrifiées), l'électrification des moyens de transport et de la production de chaleur et de froid, la volonté de consommer localement de l'énergie propre et éthique (développement des communautés locales d'énergie, mécanismes d'autoconsommation), le développement des technologies de l'information et de la communication, l'accès aux données

1. IEA (2019). *World Energy Outlook 2019*.

2. EDF (s.d.). La production d'électricité mondiale en 2018 [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.edf.fr/media/display/35398>.

électriques (développement du compteur communicant et autres capteurs) et le développement d'offres de services de flexibilité par différents acteurs (modulation de production et/ou de consommation, stockage entre autres).

L'ensemble des réseaux électriques est au cœur de ces évolutions. Cependant, le réseau de distribution connaît des changements particulièrement importants car son rôle évolue d'un objectif d'alimentation des consommateurs finaux vers une logique multidirectionnelle et de nouveaux services. Les outils de planification n'étaient pas jusqu'à présent systématiquement utilisés pour les réseaux de distribution et les méthodes d'investissements traditionnelles atteignent des limites d'utilisation avec ces nouveaux paradigmes. Ce livre se concentre particulièrement sur ces réseaux car ce sont eux qui voient apparaître le plus de diversité et de solutions innovantes.

Il s'adresse aux lecteurs ayant quelques notions de base en électricité, mais aussi aux chercheurs travaillant dans le domaine de la planification des réseaux électriques. Il donne des recommandations sur l'évolution des méthodes de planification à appliquer dès à présent. Pour cela, il est divisé en sept chapitres et propose deux niveaux de lecture : un niveau intermédiaire (chapitres 1 à 4 et chapitre 7) et un niveau avancé (chapitres 1 à 6) accessible aux personnes souhaitant approfondir les aspects théoriques que ce soit pour leur curiosité scientifique ou dans un objectif de réplique sur leur propre cas d'étude. Nous avons essayé, dans la mesure du possible et en fonction des informations accessibles, de traiter la planification sous un aspect général avec des focus sur certains pays.

– Le chapitre 1 détaille le contexte historique du développement des réseaux électriques, décrit les notions fondamentales d'électrotechnique nécessaires à la compréhension des choix effectués pour leur développement et leurs modes d'exploitation ainsi que leurs cadres réglementaires. Ce chapitre se concentre ensuite sur le réseau de distribution (description du mode de distribution et de ses composants) et présente les principaux facteurs motivant l'évolution de leurs méthodes de planification.

– Le chapitre 2 définit la notion de planification des réseaux de distribution, les indicateurs usuellement utilisés ainsi que les architectures types.

– Le chapitre 3 détaille l'impact du développement des ressources décentralisées d'énergie sur les réseaux de distribution ainsi que les dernières évolutions réglementaires pour favoriser leur intégration. Les solutions alternatives aux solutions classiques appelées flexibilités ou encore *non wire alternatives* seront énumérées ainsi que des réflexions autour de leur utilisation.

– Le chapitre 4 propose des exemples d'évolution de méthodes de planification à travers quelques cas d'étude : les réseaux interconnectés urbains denses ; les réseaux interconnectés ruraux à faible densité de charge ; et les réseaux de type microréseaux isolés

dans les zones géographiques où le réseau électrique n'existe pas encore (pays en voie de développement), dans les zones difficilement accessibles (comme des îles) ou encore dans les zones dont l'accès électrique serait très coûteux (montagnes, parcs nationaux).

– Le chapitre 5 propose aux lecteurs souhaitant approfondir l'aspect théorique de la planification une modélisation mathématique assez exhaustive du problème et les méthodes de résolution possibles.

– Le chapitre 6 détaille les algorithmes de résolution de quelques cas d'étude présentés dans le chapitre 4.

– Le chapitre 7 donne une ouverture sur les nouvelles tendances et challenges qui émergent actuellement mais dont les modèles économiques sont à confirmer : l'évolution des indicateurs de performance et d'objectifs comme la notion d'impact environnemental et de recyclabilité, le regain pour le courant continu, le besoin d'outils de modélisation systémique multi-objectifs et multisectoriels, l'évolution des outils de collecte et de traitement des données, et la multiplication des acteurs et de leurs interactions.

Une conclusion synthétise les recommandations finales émises par les auteurs sur les évolutions nécessaires de la planification des réseaux de distribution afin que ces derniers puissent être suffisamment flexibles pour intégrer les changements actuels et futurs dont la dynamique est de plus en plus rapide.