

# Table des matières

|   |    |
|---|----|
| <b>Préface</b> . . . . .  | 1  |
| Nouredine HADJSAID et Pierre MALLET   |    |
| <b>Introduction</b> . . . . .   | 5  |
| <b>Chapitre 1. Les réseaux électriques</b> . . . . .  | 9  |
| 1.1. L'électricité : un produit aussi vital que complexe. . . . .                               | 9  |
| 1.2. Histoire des réseaux électriques industriels . . . . .                                     | 12 |
| 1.2.1. Découverte du courant continu et conception<br>des premières génératrices . . . . .      | 12 |
| 1.2.2. Naissance des premiers réseaux électriques : les réseaux<br>d'éclairage public . . . . . | 13 |
| 1.2.3. Généralisation de l'AC. . . . .  | 14 |
| 1.2.4. Le regain du courant continu . . . . .   | 15 |
| 1.2.5. Développement des réseaux électriques. . . . .   | 16 |
| 1.2.6. Choix de la fréquence des réseaux électriques . . . . .                                  | 19 |
| 1.2.7. Choix des niveaux de tension des réseaux électriques . . . . .                           | 22 |
| 1.2.8. Structuration du réseau électrique . . . . .   | 24 |
| 1.3. Description technique du réseau électrique . . . . .                                       | 28 |
| 1.3.1. Le système triphasé. . . . .   | 28 |
| 1.3.2. Mode de connexion des composants du réseau électrique . . . . .                          | 35 |
| 1.3.3. Imperfections électrotechniques des réseaux électriques . . . . .                        | 37 |
| 1.4. Les réseaux de distribution. . . . .   | 45 |

|  |    |
|--|----|
| 1.4.1. Postes sources HT/MT . . . . .  | 45 |
| 1.4.2. Postes de distribution MT/BT. . . . .   | 49 |
| 1.5. Ouverture des marchés de l'énergie : apparition de nouveaux acteurs .                     | 57 |
| 1.5.1. Dérégulation du marché <i>versus</i> régulation technique . . . . .                     | 57 |
| 1.5.2. Les acteurs historiques du réseau électrique . . . . .                                  | 57 |
| 1.5.3. Les modèles de marchés dans le monde. . . . .   | 60 |
| 1.5.4. Acteurs additionnels des systèmes dérégulés. . . . .                                    | 65 |
| 1.5.5. Exemple du modèle européen. . . . .   | 66 |
| 1.6. Évolutions des rôles des consommateurs et producteurs . . . . .                           | 72 |
| 1.6.1. Essor des sources décentralisées d'énergie à base<br>d'énergies renouvelables . . . . . | 72 |
| 1.6.2. Changement de statut du consommateur : le « consom'acteur » .                           | 78 |
| 1.6.3. Les ressources décentralisées d'énergie . . . . .                                       | 79 |
| 1.7. Conclusion . . . . .  | 81 |
| 1.8. Bibliographie . . . . .   | 81 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Chapitre 2. Principes de planification des réseaux électriques<br/>de distribution . . . . .</b>              | <b>89</b> |
| 2.1. Méthodes de planification des réseaux électriques de distribution . . .                                     | 89        |
| 2.1.1. Définition. . . . .   | 89        |
| 2.1.2. Les différentes échelles de temps en planification. . . . .   | 92        |
| 2.1.3. Planification des réseaux électriques de distribution français . . . .                                    | 94        |
| 2.1.4. Indicateurs utilisés en planification et solutions communément<br>utilisées pour les satisfaire. . . . .  | 100       |
| 2.1.5. Options de planification. . . . .   | 116       |
| 2.1.6. Application des formules technico-économiques<br>sur des exemples simples . . . . .                       | 118       |
| 2.2. Architectures typiques des réseaux de distribution à neutre<br>non distribué (système européen) . . . . .   | 127       |
| 2.2.1. Architectures des réseaux MT . . . . .  | 128       |
| 2.2.2. Architectures des réseaux BT . . . . .  | 142       |
| 2.3. Architectures typiques des réseaux de distribution à neutre distribué<br>(système nord-américain) . . . . . | 143       |
| 2.3.1. Architectures des réseaux MT . . . . .  | 144       |
| 2.3.2. Architectures des réseaux BT . . . . .  | 148       |
| 2.3.3. Comparaison des architectures . . . . .   | 151       |
| 2.4. Autres architectures rencontrées dans le monde . . . . .  | 152       |
| 2.4.1. Structure <i>multidivided and multi-connected</i> (Japon et Chine) . . .                                  | 152       |
| 2.4.2. Réseau en boucles et sous-boucles (Madrid, Berlin et Chine) . . .   | 153       |

|   |     |
|---|-----|
| 2.4.3. Deux niveaux de tension, deux types de réseaux de distribution (Singapour) . . . . . | 153 |
| 2.4.4. Coupure d'artère et <i>spot network</i> (Indonésie, Malaisie) . . . . .              | 154 |
| 2.4.5. Émirats arabes unis . . . . .  | 155 |
| 2.5. Conclusion . . . . .   | 156 |
| 2.6. Bibliographie . . . . .  | 157 |

### **Chapitre 3. Intégration des ressources décentralisées d'énergie dans la planification des réseaux de distribution . . . . . 161**

|  |     |
|--|-----|
| 3.1. Introduction. . . . .   | 161 |
| 3.2. Impact des ressources décentralisées d'énergie sur les méthodes de planification des réseaux électriques de distribution. . . . .         | 161 |
| 3.2.1. Problèmes posés par l'apparition de DER . . . . .   | 161 |
| 3.2.2. Un besoin d'outil de planification avancé intégrant les DER . . . . .   | 166 |
| 3.2.3. Les recommandations des politiques gouvernementales sur l'évolution des méthodes de planification des réseaux de distribution . . . . . | 168 |
| 3.2.4. Transition vers la planification en présence de DER . . . . .   | 171 |
| 3.3. Phase 1 : planification traditionnelle dite <i>fit and forget</i> . . . . .   | 174 |
| 3.3.1. Allocation des coûts de raccordement des DER . . . . .  | 175 |
| 3.3.2. Estimation de la capacité d'accueil du réseau de distribution ( <i>hosting capacity</i> ) . . . . .                                     | 177 |
| 3.3.3. <i>Locational Net Benefit Analysis</i> (LNBA) . . . . .   | 180 |
| 3.3.4. <i>Distribution Investment Deferral Framework</i> (DIDF) . . . . .  | 181 |
| 3.4. Phase 2 : planification avec DER . . . . .  | 187 |
| 3.4.1. Liste des solutions d'insertion possibles . . . . .   | 187 |
| 3.4.2. Planification sans marché de flexibilité . . . . .  | 189 |
| 3.4.3. Planification avec marchés de flexibilité . . . . .   | 195 |
| 3.5. Conclusion . . . . .  | 201 |
| 3.6. Bibliographie . . . . .   | 202 |

### **Chapitre 4. Études de cas de planification . . . . . 207**

|   |     |
|---|-----|
| 4.1. Introduction. . . . .  | 207 |
| 4.2. État des lieux des réseaux de distribution avec DER . . . . .  | 211 |
| 4.2.1. Nouveaux critères de diagnostic des réseaux de distribution . . . . .  | 211 |
| 4.2.2. Principe général d'estimation de la puissance maximale de DER ne créant pas de contraintes sur le réseau . . . . . | 213 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.2.3. Outils d'aide à la décision sous incertitudes reposant sur la méthode de Monte-Carlo . . . . .             | 215 |
| 4.3. Réseaux interconnectés urbains denses . . . . .  | 223 |
| 4.3.1. Solution structurelle : optimisation topologique des réseaux électriques de distribution. . . . .          | 223 |
| 4.3.2. Étude de cas n° 3 : solutions reposant sur les <i>Non Wire Alternatives</i> . . . . .                      | 248 |
| 4.4. Réseaux interconnectés ruraux . . . . .  | 267 |
| 4.4.1. Étude de cas n° 4 : NWA pour intégrer des DER dans les réseaux de distribution ruraux BT . . . . .         | 267 |
| 4.4.2. Cas d'étude n° 5 : utilisation du stockage pour différer des investissements dans les réseaux BT . . . . . | 280 |
| 4.5. Réseaux de type <i>off-grid</i> . . . . .  | 286 |
| 4.5.1. Cas d'étude n° 6 : électrification rurale – Cas du Cambodge . . . . .                                      | 286 |
| 4.5.2. Cas d'étude n° 7 : zones d'accès difficiles et très coûteux (Australie) . . . . .                          | 295 |
| 4.6. Conclusion . . . . .   | 297 |
| 4.7. Bibliographie . . . . .  | 298 |

## **Chapitre 5. Outils mathématiques pour la planification . . . . . 301**

|   |     |
|---|-----|
| 5.1. Introduction. . . . .  | 301 |
| 5.2. Données d'entrée du problème de planification . . . . .                                  | 301 |
| 5.2.1. Définitions préalables . . . . .   | 301 |
| 5.2.2. Données technico-économiques . . . . .   | 306 |
| 5.2.3. Structure du réseau électrique initial. . . . .  | 308 |
| 5.2.4. Données topologiques . . . . .   | 311 |
| 5.2.5. Définition des situations dimensionnantes . . . . .                                    | 316 |
| 5.3. La planification : un problème d'optimisation multi-objectifs sous contraintes . . . . . | 318 |
| 5.3.1. Variables de décision. . . . .   | 318 |
| 5.3.2. Définition de la fonction multi-objectifs à optimiser . . . . .                        | 325 |
| 5.3.3. Définition des contraintes . . . . .   | 328 |
| 5.3.4. Le calcul de répartition de charge . . . . .   | 335 |
| 5.4. Algorithmes d'optimisation de la planification des réseaux de distribution . . . . .     | 346 |
| 5.4.1. Analyse du problème d'optimisation . . . . .   | 346 |
| 5.4.2. Découpage en sous-problèmes à optimiser . . . . .                                      | 350 |
| 5.4.3. Synthèse des méthodes d'optimisation utilisées en planification . . . . .              | 353 |
| 5.4.4. Intégration des incertitudes dans la planification . . . . .                           | 357 |
| 5.5. Conclusion . . . . .   | 360 |
| 5.6. Bibliographie . . . . .  | 361 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Chapitre 6. Outils mathématiques pour la planification : application aux études de cas</b> . . . . .  | <b>363</b> |
| 6.1. Introduction . . . . .  | 363        |
| 6.2. Méthode de décomposition de type maître-esclave avec boucle de rétroaction et utilisation de métaheuristique : cas d'étude n° 1 . . . . .       | 366        |
| 6.3. Méthode de décomposition gloutonne . . . . .  | 371        |
| 6.3.1. Heuristique : cas d'étude n° 2.a . . . . .  | 371        |
| 6.3.2. Recherche exhaustive : cas d'étude n° 2.b . . . . .   | 377        |
| 6.4. Programmation linéaire . . . . .  | 379        |
| 6.4.1. Effacement de consommation : cas d'étude n° 3.a . . . . .   | 379        |
| 6.4.2. Problème d'équilibrage des phases : <i>integer linear programming</i> : cas d'étude n° 6 . . . . .  | 384        |
| 6.5. Programmation non linéaire . . . . .  | 385        |
| 6.5.1. Stockage pour enlever les contraintes réseaux : cas d'étude n° 5 . . . . .  | 385        |
| 6.5.2. Placement et dimensionnement d'unités de stockage et de production : cas d'étude n° 6 . . . . .   | 388        |
| 6.6. Intégration des incertitudes . . . . .  | 389        |
| 6.6.1. Méthode de Monte-Carlo appliquée au calcul de la capacité d'accueil des DER et à l'intérêt technique et économique des flexibilités . . . . . | 389        |
| 6.6.2. Méthode probabiliste appliquée à l'intérêt technique et économique des flexibilités : cas d'étude 3.b . . . . .                               | 397        |
| 6.7. Conclusion . . . . .  | 404        |
| 6.8. Bibliographie . . . . .   | 404        |
| <br>   |            |
| <b>Chapitre 7. Nouvelles tendances et challenges</b> . . . . .   | <b>407</b> |
| 7.1. Introduction . . . . .  | 407        |
| 7.2. Nouvelles architectures et nouveaux produits . . . . .  | 408        |
| 7.2.1. Des nouvelles valeurs . . . . .   | 408        |
| 7.2.2. De nouveaux objets : virtualisation des assets, cas des lignes virtuelles du projet Ringo . . . . .   | 413        |
| 7.2.3. Regain pour le courant continu . . . . .  | 414        |
| 7.2.4. Nouvelles approches systémiques multi-objectifs . . . . .   | 424        |
| 7.3. Outils de planification intégrés . . . . .  | 425        |
| 7.3.1. Pourquoi intégrer ? . . . . .   | 425        |
| 7.3.2. Les enjeux des données . . . . .  | 427        |
| 7.3.3. Connecter la conduite aux modèles de planification . . . . .  | 429        |
| 7.3.4. Le challenge des compétences . . . . .  | 430        |

|  |            |
|--|------------|
| 7.4. Nouveaux acteurs économiques et nouveaux <i>business models</i> . . . . . | 431        |
| 7.4.1. Diversité des acteurs . . . . .   | 431        |
| 7.4.2. Diversité des thèmes . . . . .  | 432        |
| 7.4.3. Diversité des <i>business models</i> . . . . .                          | 434        |
| 7.5. Conclusion . . . . .  | 434        |
| 7.6. Bibliographie. . . . .  | 435        |
| <br>   |            |
| <b>Conclusion.</b> . . . . .   | <b>441</b> |
| <br>   |            |
| <b>Liste des acronymes</b> . . . . .   | <b>445</b> |
| <br>   |            |
| <b>Liste des notations</b> . . . . .   | <b>455</b> |
| <br>   |            |
| <b>Index</b> . . . . .   | <b>463</b> |