

Table des matières

Préface	1
Nouredine HADJSAID et Pierre MALLET	
Introduction	5
Chapitre 1. Les réseaux électriques	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 des premières génératrices	12
1.2.2. Naissance des premiers réseaux électriques : les réseaux 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 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

Chapitre 2. Principes de planification des réseaux électriques de distribution	89
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 utilisées pour les satisfaire.	100
2.1.5. Options de planification.	116
2.1.6. Application des formules technico-économiques sur des exemples simples	118
2.2. Architectures typiques des réseaux de distribution à neutre 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 (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

Chapitre 6. Outils mathématiques pour la planification : application aux études de cas	363
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
Chapitre 7. Nouvelles tendances et challenges	407
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
Conclusion.	441
Liste des acronymes	445
Liste des notations	455
Index	463