

# Réseaux publics de distribution d'électricité

## Fonctionnement et protection

**Michel Oddi**



## **Dans la même collection**

*La maintenance des centrales nucléaires*

J.-P. Hutin, 2016

*Efficacité énergétique – Des principes aux réalités*

P. Baudry, 2015

*Les nanomatériaux et leurs applications pour l'énergie électrique*

D. Noël, 2014

*Guide international du comptage intelligent*

F. Toledo, 2012

*Numériser le travail – Théories, méthodes, expérimentations*

S. Lahlou, V. Nosulenko, E. Samoylenko, 2012

*L'énergie hydraulique, 2<sup>e</sup> édition*

R. Ginocchio, P.-L. Viollet, 2012

*Le système nerveux du réseau français de transport d'électricité (1946-2006) :  
60 années de contrôle électrique*

J. Lecouturier, 2012

*La physique des réacteurs nucléaires*

S. Marguet, 2011

*Marketing critique : le consommateur collaborateur en question*

B. Cova, M. Louyot-Gallicher, A. Bonnemaizon, 2010

*Graphes et algorithmes*

M. Gondran, M. Minoux, 2009

*Gestion de la complexité dans les études quantitatives de sûreté de fonctionnement  
des systèmes*

M. Bouissou, 2008

*Calcul de champ électromagnétique : exemples d'application*

J.-C. Vérité, J.-P. Ducreux, G. Tanneau, P. Baraton, B. Paya, 2007

*Les télécommunications au cœur du système électrique français (1946-2000)*

A. Giandou, C. Leclère, J. Lecouturier, J.-M. Spetebroodt, H. Thibert, A. Vilatte, 2007

*Innovater en marketing, 15 tendances en mouvement*

B. Cova, M. Louyot-Gallicher, 2006

*Éléments finis pour l'ingénieur : grands principes et petites recettes*

P. Thomas, 2006

*Évaluation et maîtrise du vieillissement industriel*

A. Lannoy, H. Procaccia, 2005

## **Dans la collection Socio-économie de l'énergie**

*Énergie et transformations sociales – Enquête sur les interfaces énergétiques*

J. Cihuelo, A. Jobert, C. Grandclément, 2015

# Réseaux publics de distribution d'électricité

## Fonctionnement et protection

**Michel Oddi**

Ingénieur senior, EDF R&D

*Direction éditoriale* : Emmanuel Leclerc  
*Édition* : Mélanie Kucharczyk  
*Mise en pages* : Thierry Decke (14)  
*Fabrication* : Estelle Perez  
*Couverture* : Isabelle Godenèche

# Préface

L'ouvrage de Michel Oddi apporte un éclairage indispensable sur un objet, les réseaux publics de distribution d'électricité, au cœur des transitions énergétiques engagées dans de nombreux pays du monde et en particulier en Europe, afin de contribuer à la décarbonation des économies et à la lutte contre le changement climatique.

Ainsi, le développement à des rythmes soutenus, notamment grâce à des subventions parfois conséquentes, de productions d'électricité décentralisées à partir d'énergies renouvelables, (photovoltaïque et éolien, caractérisés par leur intermittence, biomasse...), impacte sensiblement les principes de développement et les modalités d'exploitation des réseaux publics de distribution d'électricité.

En effet, jusqu'à récemment, ces réseaux irriguaient les territoires, distribuant aux clients, de l'amont vers l'aval, une énergie électrique produite dans des centrales de grande taille et transportée par les grands réseaux à très haute tension. Aujourd'hui, les productions décentralisées raccordées au sein même des réseaux publics de distribution viennent modifier les flux d'énergie sur ces réseaux, allant parfois jusqu'à créer des flux remontant vers les réseaux à très haute tension.

À ces ressources d'énergie décentralisées s'ajoutent également de nouveaux usages de l'électricité tels que les véhicules électriques, qui constituent une solution de décarbonation du secteur du transport, secteur particulièrement polluant, ou bien encore les pompes à chaleur, dont l'efficacité énergétique n'est plus à démontrer. Toutes ces nouvelles installations sont et seront raccordées aux réseaux publics de distribution.

Les réseaux publics de distribution, on l'aura compris, sont donc confrontés à des évolutions qui affectent tant leur exploitation que le développement de leur architecture.

Les « réseaux intelligents », souvent désignés par l'anglicisme « smart grids », sont, nous dit-on, l'avenir des réseaux publics de distribution. Si ce concept de « réseaux intelligents » a émergé depuis quelques années et a été largement repris par de nombreux médias, il ne faut pas en déduire que l'intelligence ne serait parvenue aux réseaux que dans cette dernière décennie.

Bien au contraire, et l'ouvrage de Michel Oddi en rend bien compte, les réseaux de transport et de distribution disposent depuis longtemps d'équipements et de systèmes « intelligents » pour assurer une exploitation fiable et sécurisée. Néanmoins, les développements technologiques récents dans les domaines du numérique, de la communication, de la robotique, des matériaux... ouvrent de nouvelles possibilités pour relever, en particulier, les défis de l'intégration des nouvelles ressources énergétiques, décentralisées et le plus souvent intermittentes, de l'intégration de solutions de stockage, notamment, pour pallier cette intermittence et des nouveaux usages de l'électricité (véhicule électrique, micro-cogénération, pompes à chaleur...). Ainsi, les ingénieurs du monde des réseaux inventent de nouveaux systèmes et de nouvelles solutions, les testent puis les mettent en œuvre, améliorant et optimisant encore le développement et l'exploitation des réseaux électriques.

Le livre de Michel Oddi arrive à point nommé, d'abord pour nous rappeler l'histoire et les fondamentaux physiques et mathématiques des réseaux publics de distribution, puis pour identifier les enjeux d'un développement et d'une exploitation fiable et sécurisée de ces réseaux et ouvrir sur les diverses solutions mises en œuvre ou en développement.

Ce retour aux sources s'impose, car si les nouvelles technologies, en particulier « le numérique », constituent indéniablement un facteur d'innovations et de transformations du monde des réseaux, ceux-ci ont une réalité physique qui a ses lois que l'ingénieur, concepteur ou exploitant, doit connaître.

Michel Oddi, ingénieur chercheur à EDF, est l'un de ces rares hommes qui ont œuvré, toute leur carrière, à la fois dans le monde concret de la distribution d'électricité et dans le monde, conceptuel et expérimental, donc réel, de la recherche et du développement<sup>1</sup>. Ce mariage d'expériences est au cœur de ce recueil exceptionnellement complet des principes théoriques et des applications concrètes formulées dans ce livre.

L'étudiant et le praticien des réseaux y trouveront matière à s'enrichir et à articuler théorie et solutions concrètes.

Mais il est un point qu'il me faut également souligner et qui constitue l'un des thèmes majeurs de cet ouvrage dans lequel Michel Oddi nous fait partager des connaissances clés et trop rarement formulées. Il s'agit du problème de la protection des réseaux. Ce sujet éminemment important concerne tout à la fois la conception et la mise en œuvre des dispositifs qui, d'une part, protègent le fonctionnement de ces infrastructures essentielles à la vie de nos concitoyens et au développement économique, d'autre part, contribuent à assurer la sécurité à la fois des personnels d'exploitation et de maintenance, des usagers eux-mêmes, mais également des tiers. Ce sujet trop souvent « oublié » dans les articles qui

---

1. Michel Oddi est également l'architecte, le « père fondateur », d'une plate-forme de recherche et de développement industriel appelée Concept Grid, située à EDF Lab Les Renardières près de Fontainebleau, qui permet d'expérimenter de multiples solutions « smart grids » avant leur installation sur des réseaux réels de distribution.

s'intéressent aux réseaux publics de distribution, Michel Oddi le développe avec toute sa pédagogie.

Enfin, le livre de Michel Oddi nous délivre de nombreux exemples d'applications et de solutions mises en œuvre dans divers pays du monde. Le lecteur profitera ainsi de la vision transnationale de Michel Oddi, acquise au sein d'organisations et d'associations techniques internationales où ses compétences ont été maintes fois reconnues et récompensées.

Merci à Michel Oddi d'avoir rassemblé cette somme de connaissances et de compétences et de nous l'offrir dans cet ouvrage qui croise intelligemment fondamentaux et applications industrielles.

Jean-François Faugeras

*Responsable du département Veille à la Direction de la Stratégie d'EDF*

## *Remerciements*

Je voudrais adresser tous mes remerciements à Stéphane Andrieu, Jean-François Faugeras et Claire Lajoie-Mazenc qui m'ont convaincu d'écrire cet ouvrage, à Jean Bergeal et au regretté Dominique Klaja à qui ce livre est dédié pour leur travail de relecture et leurs pertinentes observations, à Aude Pelletier, Benoît Puluhen, Thierry Pelinski, Xavier Charpentier et Thierry Soulaine pour l'aide qu'ils m'ont apportée.



## *Avertissement*

Dans ce livre, il est parfois fait référence à des normes internationales, européennes et françaises. Ces textes évoluent régulièrement, aussi les informations issues de ces normes peuvent avoir été modifiées depuis la date d'écriture du texte, c'est-à-dire juin 2016 : il est conseillé de vérifier qu'elles sont toujours d'actualité ou, dans le cas contraire, de tenir compte des évolutions intervenues depuis.



# Tables des matières

Préface . . . . .	V
Remerciements . . . . .	VIII
Avertissement . . . . .	IX

## Chapitre 1

<b>Un peu d'histoire . . . . .</b>	<b>1</b>
1. De l'Antiquité aux premiers balbutiements . . . . .	1
2. L'arrivée de l'électromagnétisme et de nouvelles découvertes . . . . .	4
3. Le règne du courant continu et les premières applications de l'électricité. . . . .	9
3.1. Génération et force motrice . . . . .	9
3.2. Éclairage . . . . .	10
3.3. Premières centrales . . . . .	11
3.4. Transport d'électricité et traction électrique . . . . .	12
4. La controverse Edison Westinghouse . . . . .	12
4.1. Transformateur . . . . .	12
4.2. Génératrices et moteurs à courant alternatifs . . . . .	14
4.3. Le courant alternatif s'impose . . . . .	15
5. Le choix du courant alternatif triphasé . . . . .	17
6. L'interconnexion et la nécessité de standardiser . . . . .	17
7. Le poids de l'histoire sur les réseaux . . . . .	18
<b>Annexe – Comparaison des systèmes mono- et triphasés . . . . .</b>	<b>21</b>
1. Puissance fluctuante monophasée et puissance constante triphasée . . . . .	21
2. Transport monophasé et triphasé . . . . .	22
3. Champ tournant . . . . .	22
4. Mise à disposition de deux niveaux de tensions . . . . .	24

Chapitre 2

**Rappel des principales règles électrotechniques**

<b>et conventions.</b>	25
1. Différentes représentations des grandeurs électriques sinusoïdales.	25
1.1. Représentation de Fresnel	25
1.2. Opérateurs $j$ et $a$	26
1.3. Représentation dans le plan complexe	27
1.4. Conventions	27
2. Résistances, inductances et capacités	27
2.1. Équations fondamentales	28
2.2. Équations en régime sinusoïdal	28
3. Transformation série parallèle.	29
3.1. Transformation parallèle série	30
3.2. Transformation série parallèle	30
3.3. Transformation triangle étoile et étoile triangle	31
4. Puissance instantanée et moyenne.	33
4.1. Puissance en mode monophasé et triphasé	33
4.2. Valeurs efficaces	34
4.3. Puissance active, réactive et apparente.	35
5. Principaux théorèmes.	36
5.1. Lois de Kirchhoff	36
5.2. Théorème de Boucherot	37
5.3. Théorème de superposition	37
5.4. Théorème de Thévenin	38
5.5. Théorème de Norton	39
5.6. Théorème de Fortescue	39
6. Application du théorème de Fortescue	41
6.1. Schéma équivalent	41
6.2. Équations du défaut monophasé (entre phase et terre)	43
6.3. Défaut biphasé isolé	46
6.4. Défaut biphasé et à la terre	48
6.5. Défaut triphasé et à la terre.	51
6.6. Ouverture (coupure) d'une phase	52
7. Grandeurs caractéristiques des différentes situations de réseau déséquilibré	56
<b>Annexe</b>	57
1. Transformation d'un circuit RLC parallèle en impédance série	57
2. Équations des régimes déséquilibrés	57

*Chapitre 3*

<b>Réseaux de transport et de distribution</b> .....	63
1. Les différents types de réseaux : avantages et inconvénients .....	63
1.1. Réseaux maillés .....	63
1.2. Réseaux bouclés .....	65
1.3. Réseaux arborescents .....	67
1.4. Tableau comparatif .....	68
2. Réseaux de transport et de distribution .....	69
2.1. Réseaux de transport .....	69
2.2. Réseaux de distribution .....	70
2.3. Réseaux français .....	70
3. Structure des réseaux de distribution .....	70
3.1. Postes primaires .....	70
3.2. Réseaux moyenne tension .....	72
3.3. Distribution monophasée et triphasée .....	74

*Chapitre 4*

<b>Stabilité des réseaux de transport et contribution des réseaux de distribution</b> .....	75
1. Équilibre production consommation .....	76
1.1. Stabilité des alternateurs .....	76
1.2. Stabilité statique d'un alternateur .....	77
1.3. Stabilité dynamique d'un alternateur .....	78
1.4. Statisme et équilibre production consommation .....	79
2. Tension, puissance active transmissible et puissance réactive .....	81
2.1. Chute de tension et déphasage aux extrémités d'une ligne de transport .....	81
2.2. Puissance maximale transmissible .....	82
2.3. Tension et puissance réactive .....	84
3. Compensation de la puissance réactive .....	85
3.1. Réseaux de distribution .....	85
3.2. Réseaux de transport .....	86
4. Réglage de tension .....	86
4.1. Réseaux de transport .....	86
4.2. Réseaux de répartition et de distribution .....	87
5. Mécanisme des incidents de grande ampleur .....	89
5.1. Surcharges en cascade .....	89
5.2. Écroulement de tension .....	90
5.3. Écroulement de fréquence .....	91
5.4. Rupture de synchronisme .....	91
6. Défense du système .....	92
7. Contribution des réseaux de distribution .....	93

Chapitre 5

**Grandeurs caractéristiques, perturbations et dispositions**

<b>constructives des réseaux</b> .....	95
1. Vocabulaire .....	95
1.1. Tension assignée et de service .....	96
1.2. Courant permanent admissible et de courte durée .....	96
1.3. Domaines de tension français et internationaux .....	96
1.4. Puissance de court-circuit .....	98
1.5. Pouvoir de coupure (resp. fermeture) .....	98
2. Courant de court-circuit .....	98
2.1. Calcul du courant de court-circuit .....	98
2.2. Court-circuit symétrique .....	101
2.3. Court-circuit asymétrique .....	101
2.4. Courant de crête et courant stabilisé .....	102
3. Mécanismes des surtensions .....	102
3.1. Surtensions à fréquence industrielle .....	102
3.2. Surtensions de manœuvres .....	105
3.3. Surtensions d'origine atmosphérique .....	114
4. Coordination de l'isolement .....	117
4.1. Distance d'isolement .....	118
4.2. Tenue à la fréquence industrielle .....	119
4.3. Tenue aux surtensions de manœuvres .....	119
4.4. Tenue aux surtensions atmosphériques .....	119
4.5. Conception de l'appareillage .....	119
4.6. Notion de séparation .....	120
4.7. Niveaux normés d'isolement .....	121
5. Éclateurs et parafoudres .....	126
5.1. Éclateurs .....	126
5.2. Parafoudres .....	127
5.3. Protection et installation d'un parafoudre .....	129
6. Compatibilité électromagnétique .....	137
6.1. Perturbations conduites et rayonnées .....	138
6.2. Types de couplage .....	138
6.3. Modes de propagation .....	140
6.4. Principales exigences d'immunités .....	142
6.5. Compléments .....	147
7. Principales caractéristiques électriques des ouvrages .....	149
7.1. Circuits de puissance .....	149
7.2. Matériels de contrôle commande .....	149
7.3. Essais d'acceptation de type et de routine .....	150
<b>Annexe</b> .....	151
1. Résolution des équations différentielles du second ordre .....	151

1.1.	Association de l'équation différentielle à son équation caractéristique . . . . .	151
1.2.	Solutions générales de l'équation différentielle homogène . . . . .	151
1.3.	Solution particulière et solution générale . . . . .	152
2.	Modélisation des lignes et câbles – équation des télégraphistes . . . . .	153
2.1.	Quadripôle de Kirchhoff . . . . .	153
2.2.	Équations des télégraphistes . . . . .	156
2.3.	Propagation d'une onde sur une ligne sans perte . . . . .	157
3.	Caractéristiques habituelles des câbles et lignes sous 20 kV . . . . .	158

### Chapitre 6

<b>Montées en potentiel, prises et réseaux de terre, risques de choc électrique . . . . .</b>	<b>161</b>	
1.	Mise à la terre et comportement en basse fréquence . . . . .	162
1.1.	Électrode de terre hémisphérique . . . . .	163
1.2.	Prise de terre et réseau de terre réels . . . . .	166
1.3.	Retour du courant par une deuxième terre . . . . .	172
2.	Méthodes de mesure . . . . .	174
2.1.	Mesure de la résistivité du sol . . . . .	174
2.2.	Mesure de la résistance de terre . . . . .	177
2.3.	Choix de la méthode de mesure de terre . . . . .	181
3.	Comportement des prises et des circuits de terre en régime transitoire . . . . .	183
3.1.	Influence de l'inductance . . . . .	183
3.2.	Influence de la valeur du courant . . . . .	186
3.3.	Comportements . . . . .	186
4.	Tension de pas et de toucher : risques de chocs électriques . . . . .	187
4.1.	Impédance du corps humain . . . . .	187
4.2.	Réaction au passage d'un courant dans le corps . . . . .	188
4.3.	Réaction à une tension de contact . . . . .	189
5.	Réalisation des prises et réseaux de terre . . . . .	190
5.1.	Respect des tensions de toucher et de pas . . . . .	190
5.2.	Transfert de potentiel . . . . .	191
5.3.	Norme NF EN 50522 . . . . .	191
5.4.	Réglementations et guides pratiques . . . . .	193
5.5.	Réseaux souterrains . . . . .	195
<b>Annexe – Formule des résistances de terre . . . . .</b>	<b>196</b>	

### Chapitre 7

<b>Du magnétisme à la théorie du transformateur . . . . .</b>	<b>201</b>	
1.	Rappels théoriques . . . . .	201
1.1.	Champ d'induction magnétique . . . . .	202
1.2.	Loi de Lenz . . . . .	203

1.3.	Théorème d'Ampère . . . . .	203
2.	Matériaux magnétiques . . . . .	204
2.1.	Intensité de champ magnétique . . . . .	204
2.2.	Classement des matériaux magnétiques . . . . .	206
3.	Matériaux ferromagnétiques . . . . .	206
3.1.	Courbe de première aimantation . . . . .	206
3.2.	Cycle d'hystérésis . . . . .	207
3.3.	Matériaux doux et durs . . . . .	208
4.	Circuit magnétique et bobine monophasée . . . . .	209
4.1.	Force magnétomotrice et relation d'Hopkinson . . . . .	210
4.2.	Inductance et énergie magnétique . . . . .	211
4.3.	Énergie magnétique . . . . .	213
4.4.	Pertes magnétiques . . . . .	214
4.5.	Fuites dans l'air . . . . .	216
4.6.	Schéma équivalent et courant magnétisant . . . . .	217
4.7.	Effet d'un entrefer . . . . .	218
5.	Transformateur idéal . . . . .	219
5.1.	Rapport entre tensions . . . . .	220
5.2.	Relations entre les courants . . . . .	221
5.3.	Adaptation d'impédance . . . . .	221
5.4.	Limitation du nombre de spires . . . . .	221
5.5.	Modélisation d'un transformateur idéal . . . . .	222
6.	Transformateur réel . . . . .	222
6.1.	Équations de base . . . . .	222
6.2.	Transformateur à vide . . . . .	223
6.3.	Transformateur en charge . . . . .	225
6.4.	Modélisation d'un transformateur réel . . . . .	226
6.5.	Influence du cycle d'hystérésis et de la saturation sur le courant de magnétisation . . . . .	226
6.6.	Courant d'appel à la mise sous tension à vide . . . . .	228
6.7.	Chute de tension et triangle de Kapp . . . . .	231
6.8.	Mise en parallèle de deux ou plusieurs transformateurs . . . . .	232
6.9.	Grandeurs réduites . . . . .	234
7.	Transformateurs à colonnes et cuirassés . . . . .	234
7.1.	Transformateurs à colonnes . . . . .	235
7.2.	Transformateur cuirassé . . . . .	235
7.3.	Flux libre et flux forcé . . . . .	236
8.	Autotransformateur . . . . .	237
9.	Couplage et impédance homopolaire des transformateurs triphases . . . . .	238
9.1.	Représentation de Fresnel des tensions en fonction du mode de couplage . . . . .	238
9.2.	Couplage d'un transformateur . . . . .	239
9.3.	Impédance homopolaire . . . . .	240



10. Alimentation d'une charge monophasée par un transformateur triphasé. . . . .	244
10.1. Schéma équivalent . . . . .	244
10.2. Couplage $Yy$ . . . . .	245
10.3. Couplage $Yyn$ . . . . .	245
10.4. Couplage $YNyn$ . . . . .	247
10.5. Couplage $Dyn$ . . . . .	247
10.6. Couplage $Yzn$ . . . . .	248
11. Transformateurs spéciaux . . . . .	248
11.1. Transformateurs de Scott . . . . .	248
11.2. Transformateur de Leblanc. . . . .	249
11.3. Transformateur déphaseur. . . . .	250
12. Génération d'harmoniques . . . . .	250
12.1. Transformateur de type $YNyn$ . . . . .	251
12.2. Transformateur de type $Yy$ . . . . .	252
12.3. Transformateur de type $Dyn$ . . . . .	252
12.4. Utilisation d'un enroulement tertiaire . . . . .	253
13. Choix du couplage . . . . .	253
14. Rendement et grandeurs de court-circuit . . . . .	253
14.1. Pertes d'un transformateur . . . . .	253
14.2. Classement en fonction des pertes . . . . .	254
14.3. Grandeurs à vide et en court-circuit . . . . .	256
15. Technologie. . . . .	259
15.1. Transformateur dans l'huile . . . . .	260
15.2. Changeur de prises (régleur en charge) . . . . .	268
15.3. Bruit . . . . .	273
16. Transformateurs de distribution . . . . .	273
16.1. Transformateurs secs. . . . .	274
16.2. Transformateur à protection coupure. . . . .	274
17. Transformateur isolé au $SF_6$ . . . . .	274
<b>Annexe</b> . . . . .	276
1. Tableau des impédances homopolaires des transformateurs les plus courants. . . . .	276
2. Impédance de court-circuit d'un transformateur . . . . .	278
3. Conséquence de la perte d'une phase primaire d'un transformateur triangle étoile à flux forcé. . . . .	280
4. Circulation d'un courant de neutre à la mise sous tension d'un transformateur voisin. . . . .	281

### Chapitre 8

<b>Régimes de neutre</b> . . . . .	285
1. Surtensions sur les réseaux basse tension consécutifs aux défauts à la terre à moyenne tension. . . . .	286

1.1.	Passage de la moyenne tension sur la basse tension . . . . .	286
1.2.	Couplage des terres . . . . .	287
1.3.	Influence du régime de neutre et limites réglementaires . . . . .	289
2.	Modélisation du réseau de distribution . . . . .	290
3.	Défaut franc à la terre : circuit équivalent <i>RLC</i> et représentation de Fresnel . . . . .	292
4.	Neutre mis à la terre par une impédance de faible valeur (faiblement impédant) . . . . .	294
5.	Neutre isolé . . . . .	296
6.	Neutre compensé (bobine de Petersen) . . . . .	297
6.1.	Principes . . . . .	297
6.2.	Maîtrise des surtensions dans le cas des réseaux aéro-souterrains . . . . .	299
6.3.	Limites de la compensation . . . . .	300
7.	Neutre direct à la terre . . . . .	302
7.1.	Neutre distribué . . . . .	302
7.2.	Neutre non distribué . . . . .	304
8.	Accord des réseaux à neutre compensé . . . . .	304
8.1.	Principe d'accord . . . . .	304
8.2.	Méthode du maximum de tension homopolaire . . . . .	310
8.3.	Méthode du cercle des lieux . . . . .	312
8.4.	Méthode par injection . . . . .	314
9.	Bobine de Petersen . . . . .	318
9.1.	Bobines à réglage continu . . . . .	318
9.2.	Bobines réglables par pas . . . . .	319
9.3.	Raccordements des bobines . . . . .	321
9.4.	Compensation en réseau . . . . .	323
10.	Exploitation à défaut maintenu . . . . .	324
<b>Annexe</b> . . . . .		325
1.	Déplacement du point neutre en cas de défaut à la terre . . . . .	325
1.1.	Neutre isolé . . . . .	326
1.2.	Neutre mis à la terre par une résistance . . . . .	326
1.3.	Neutre mis à la terre par une inductance et une résistance . . . . .	327
2.	Quelques pratiques de compensation du neutre moyenne tension . . . . .	328
3.	Courants d'écran de câbles en cas de défaut à la terre . . . . .	328
3.1.	Types de câbles . . . . .	328
3.2.	Courants dans les écrans de câbles unipolaires des portions saines de réseau . . . . .	330
3.3.	Courant de défaut . . . . .	338
3.4.	Courant dans les prises d'écran d'un câble en tête de poste . . . . .	338
3.5.	Application numérique . . . . .	340
3.6.	Tronçon en défaut . . . . .	341
3.7.	Conclusion . . . . .	342

*Chapitre 9*

<b>Schéma des liaisons à la terre en basse tension</b> .....	343
1. Neutre basse tension et schéma des liaisons à la terre .....	343
2. Schéma TT .....	345
3. Schéma TN .....	346
3.1. Schéma TN-C .....	346
3.2. Schéma TN-S .....	347
3.3. Schéma TN-C-S .....	348
4. Schéma IT .....	348
4.1. Coexistence de plusieurs schémas de liaison à la terre .....	350
5. Comparaison et pratiques des différents schémas de liaisons à la terre	350
5.1. Surtensions et sécurité .....	350
5.2. Continuité de fourniture .....	351
5.3. Maintenance et robustesse .....	351
5.4. Rupture du neutre .....	351
5.5. Pratiques .....	351
<b>Annexe – Surtensions en cas de rupture du neutre basse tension</b> ..	353

*Chapitre 10*

<b>Résonance et ferrorésonance</b> .....	357
1. Résonance .....	358
1.1. Résonance série .....	358
1.2. Résonance parallèle .....	358
1.3. Cas de résonance .....	359
2. Mécanisme de la ferrorésonance .....	360
2.1. Construction graphique .....	360
2.2. Formes d'onde et fréquence .....	363
2.3. Classification .....	366
3. Exemples de ferrorésonance .....	366
3.1. Transformateurs de tension en cas de réseau à neutre isolé .....	366
3.2. Transformateurs de tension connectés entre phases .....	367
3.3. Réseau à neutre compensé .....	368
4. Présomption de ferrorésonance et solutions .....	368
<b>Annexe – Résonance d'un réseau mis à la terre par bobine de Petersen</b> .....	369

*Chapitre 11*

<b>Capteurs de mesures : type, comportement et spécification</b> .....	373
1. Transformateur de courant à effet inductif .....	373
1.1. Comportement .....	373

1.2.	Caractéristiques . . . . .	375
1.3.	Réponse d'un transformateur saturé . . . . .	377
1.4.	Choix d'un transformateur de courant de protection . . . . .	379
1.5.	Réalisation pratique . . . . .	380
2.	Capteur de courant à bobine de Rogowski . . . . .	382
2.1.	Théorie . . . . .	382
2.2.	Réalisation pratique . . . . .	384
2.3.	Détermination d'un capteur à bobine de Rogowski . . . . .	386
3.	Autres techniques de mesure du courant . . . . .	386
3.1.	Capteur à effet Hall . . . . .	386
3.2.	Capteur optique . . . . .	387
4.	Transformateurs de tension à effet inductif . . . . .	388
4.1.	Caractéristiques . . . . .	389
4.2.	Risque de ferrorésonance . . . . .	391
4.3.	Choix d'un transformateur de tension . . . . .	391
5.	Capteur de tension à effet capacitif . . . . .	392
6.	Mesure de la tension par diviseur . . . . .	393
6.1.	Diviseurs capacitifs . . . . .	393
6.2.	Diviseurs résistifs . . . . .	395
6.3.	Diviseurs mixtes . . . . .	395
7.	Capteur de tension à effet optique . . . . .	395
8.	Capteurs non conventionnels et hybrides . . . . .	396
9.	Mise en œuvre des transformateurs de courant et de tension . . . . .	396
9.1.	Transformateurs de courant . . . . .	396
9.2.	Transformateurs de tension . . . . .	398
10.	Conclusion . . . . .	401
<b>Annexe . . . . .</b>		<b>402</b>
1.	Erreurs admissibles des transformateurs de courant selon la norme CEI EN 61869-2 . . . . .	402
2.	Erreurs admissibles des transformateurs de tension selon la norme CEI EN 61869-3 . . . . .	403
2.1.	Transformateurs de mesure . . . . .	403
2.2.	Transformateur de protection . . . . .	403

*Chapitre 12*

<b>Introduction au plan de protection des réseaux à moyenne tension . . . . .</b>		<b>405</b>
1.	Réseaux publics de distribution moyenne tension . . . . .	406
1.1.	Structure des postes primaires . . . . .	406
1.2.	Réseau public de distribution à moyenne tension . . . . .	407
1.3.	Structure des réseaux moyenne tension . . . . .	408
1.4.	Réseaux amont et aval . . . . .	411

2.	Typologie et terminologie des défauts. . . . .	412
2.1.	Nombre de phases affectées . . . . .	412
2.2.	Résistance du défaut. . . . .	412
2.3.	Emplacement des défauts. . . . .	413
2.4.	Nature du défaut. . . . .	414
2.5.	Durée de coupure . . . . .	416
3.	Courant de défauts polyphasés. . . . .	416
3.1.	Courants de défaut bi- et triphasé. . . . .	416
3.2.	Phases des courants de défaut bi- et triphasé . . . . .	418
4.	Courants de défaut à la terre en régime stabilisé . . . . .	420
4.1.	Circulation des courants et schéma homopolaire équivalent . . . . .	420
4.2.	Rapport entre courants résiduels dans les arrivées et les départs . . . . .	422
4.3.	Calcul des courants, tensions et résistance de défaut . . . . .	425
4.4.	Phases des tensions et courants . . . . .	432
5.	Défaut très résistant : évolution du courant résiduel et interprétation . . . . .	432
5.1.	Variation du courant résiduel. . . . .	432
5.2.	Détection d'un défaut résistant . . . . .	434
6.	Présence et amplification d'harmoniques . . . . .	435
7.	Régimes transitoires d'établissement d'un défaut à la terre . . . . .	436
7.1.	Superposition de trois régimes transitoires d'établissement du défaut . . . . .	436
7.2.	Décharge de la phase en défaut . . . . .	437
7.3.	Oscillations à moyenne fréquence. . . . .	439
7.4.	Conclusion . . . . .	452
8.	Régime transitoire d'extinction. . . . .	453
8.1.	Mise en équation. . . . .	453
8.2.	Application numérique. . . . .	457
8.3.	Cas particulier des régimes de neutre isolé. . . . .	460
9.	Analyse des défauts à la terre affectant les réseaux à neutre compensé . . . . .	462
9.1.	Mécanisme des défauts auto-extincteurs et intermittents sur les réseaux à neutre compensé . . . . .	462
9.2.	Types de défauts . . . . .	463
9.3.	Cas particulier des réseaux à neutre isolé . . . . .	463
10.	Conclusion. . . . .	464
10.1.	Défauts polyphasés. . . . .	464
10.2.	Défauts à la terre. . . . .	464
<b>Annexe . . . . .</b>		<b>467</b>
1.	Cas particulier de bobine zigzag sur un jeu de barres . . . . .	467
2.	Exemples de calcul de résistance de défaut. . . . .	468
2.1.	Cas d'un neutre mis à la terre par une résistance. . . . .	468
2.2.	Cas d'un réseau à neutre compensé . . . . .	470
2.3.	Conclusion . . . . .	472

3. Types de défauts à la terre en régime de neutre compensé . . . . .	473
4. Établissement des défauts à la terre en régime de neutre compensé . . .	475

*Chapitre 13*

<b>Protections et automatismes</b> . . . . .	479
1. Protections à temps constant et protections à temps dépendant . . . . .	479
2. Protections ampèremétriques . . . . .	481
3. Protections voltmétriques . . . . .	481
4. Protections directionnelles . . . . .	482
4.1. Protection directionnelle de terre . . . . .	482
4.2. Protection directionnelle de phase . . . . .	493
5. Protection à variation d'admittance homopolaire . . . . .	495
6. Protection différentielle . . . . .	496
6.1. Protection différentielle de ligne . . . . .	497
6.2. Protection différentielle de barres ou de transformateur . . . . .	501
6.3. Protection de masse . . . . .	509
7. Protection de distance . . . . .	510
7.1. Principes généraux . . . . .	510
7.2. Zones de détection . . . . .	512
7.3. Stades et protection de zones . . . . .	516
7.4. Mise en œuvre . . . . .	518
8. Relais Buchholz . . . . .	518
9. Automatismes . . . . .	519
9.1. Réenclencheurs . . . . .	519
9.2. Disjoncteurs shunt . . . . .	524
9.3. Détecteur de terre résistante . . . . .	529
10. Sensibilité des protections ampèremétriques contre les défauts à la terre . . . . .	530
10.1. Protection ampèremétrique homopolaire des départs . . . . .	532
10.2. Protection ampèremétrique homopolaire des arrivées . . . . .	532
10.3. Protection wattmétrique homopolaire . . . . .	533
10.4. Protection centralisée de terre résistante . . . . .	534
11. Protection par fusibles . . . . .	536
11.1. Technologie et mécanisme de la coupure et de la limitation du courant . . . . .	537
11.2. Courbes de fusion et de limitation du courant . . . . .	539
11.3. Compléments sur les fusibles moyenne tension . . . . .	540

<b>Annexe – Codification ANSI des protections</b> . . . . .	543
---	-----

*Chapitre 14*

<b>Exemples de plan de protection des réseaux publics et réglages</b> .	545
1. Protection, automatismes et contrôle commande . . . . .	545

1.1.	Protections et automatismes . . . . .	545
1.2.	Localisation et coordination des protections . . . . .	546
1.3.	Contrôle commande . . . . .	546
2.	Plan de protection d'un réseau électrique . . . . .	547
2.1.	Qualité et nécessité d'un compromis . . . . .	547
2.2.	Principes . . . . .	548
2.3.	Organisation . . . . .	549
2.4.	Niveaux de protections . . . . .	549
3.	Sélectivité . . . . .	551
3.1.	Sélectivité chronométrique . . . . .	551
3.2.	Sélectivité logique . . . . .	556
4.	Grands principes des réglages d'un plan de protection . . . . .	557
4.1.	Secours et sélectivité . . . . .	557
4.2.	Respect des niveaux de surtension sur le lieu d'un défaut à la terre . . . . .	557
4.3.	Risques de déclenchement par sympathie . . . . .	558
5.	Protection contre les défauts polyphasés . . . . .	558
5.1.	Protections ampèremétriques de phase à temps constants . . . . .	559
5.2.	Protection des transformateurs de puissance . . . . .	562
5.3.	Automatismes . . . . .	563
5.4.	Sélectivité logique . . . . .	564
5.5.	Cas particulier des mises sous tension . . . . .	564
5.6.	Récapitulatif des principaux réglages . . . . .	566
6.	Protection contre les défauts à la terre en régime de neutre faiblement impédant . . . . .	566
6.1.	Seuils ampèremétriques des protections ampèremétriques homopolaires . . . . .	567
6.2.	Seuils chronométriques des protections ampèremétriques homopolaires . . . . .	572
6.3.	Protection des transformateurs de puissance . . . . .	573
6.4.	Protections de masse . . . . .	574
6.5.	Automatismes . . . . .	578
6.6.	Cas particuliers des mises sous tension . . . . .	579
6.7.	Récapitulatif des principaux réglages . . . . .	579
6.8.	Mise en œuvre de protections directionnelles de terre . . . . .	580
6.9.	Détection des défauts à la terre résistants et très résistants : limites . . . . .	582
7.	Protection contre les défauts à la terre en régime de neutre compensé . . . . .	588
7.1.	Chaînes de détection . . . . .	589
7.2.	Allongement des temporisations . . . . .	589
7.3.	Protections homopolaires directionnelles de départ (niveau 3) . . . . .	590
7.4.	Protections voltmétriques homopolaires des arrivées moyenne tension (niveau 2) . . . . .	591
7.5.	Protection de la liaison entre transformateur de puissance et arrivée(s) moyenne tension (niveau 1) . . . . .	595

7.6.	Protection centralisée de terre résistante . . . . .	595
7.7.	Protections de masse. . . . .	595
7.8.	Défauts très résistants. . . . .	596
7.9.	Seuils chronométriques des protections ampèremétriques et voltmétriques homopolaires . . . . .	596
7.10.	Protection des transformateurs de puissance. . . . .	598
7.11.	Sélectivité logique. . . . .	598
7.12.	Cas particulier des mises sous tension. . . . .	598
7.13.	Réenclencheur . . . . .	599
7.14.	Récapitulatif des principaux réglages . . . . .	599
8.	Cas particulier des travaux sous tension. . . . .	599
8.1.	Travaux sur un départ radial (régime spécial d'exploitation A) . . .	600
8.2.	Travaux sur deux départs bouclés (régime spécial d'exploitation B) . . . . .	601
9.	Protection des postes secondaires et du réseau basse tension. . . . .	601
9.1.	Structure des postes secondaires moyenne basse tension. . . . .	601
9.2.	Protection d'un transformateur de poste secondaire par fusibles .	603
9.3.	Ordres de grandeur des courants de court-circuit . . . . .	604
9.4.	Courbes de fusion des fusibles moyenne et basse tensions. . . . .	605
9.5.	Courants de défaut sur le réseau basse tension . . . . .	606
9.6.	Protection contre les défauts monophasés moyenne tension affectant un poste secondaire . . . . .	607
9.7.	Risque de retour de tension en cas de fonctionnement d'un fusible . . . . .	607
10.	Détection des défauts en réseau. . . . .	608
10.1.	Sensibilité. . . . .	609
10.2.	Principes de détection. . . . .	609
10.3.	Réalisation pratique . . . . .	610
10.4.	Mise en œuvre. . . . .	611
11.	Conclusion. . . . .	613
<b>Annexe</b> . . . . .		615
1.	Sélectivité des protections de type EPATR . . . . .	615
1.1.	Mise à la terre du neutre par une résistance de $40 \Omega$ . . . . .	616
1.2.	Mise à la terre par une bobine et une résistance $(40 + j40) \Omega$ . . . .	617
1.3.	Conclusion . . . . .	619
2.	Exemple de plan de protection d'un réseau à neutre impédant . . . . .	620
<i>Chapitre 15</i>		
<b>Les réseaux intelligents</b> . . . . .		621
1.	Automatismes de reprise des réseaux publics de distribution . . . . .	622
1.1.	Automatismes décentralisés de reprise . . . . .	622
1.2.	Reconfiguration d'un départ . . . . .	626
1.3.	Automatismes centralisés de reprise . . . . .	630



---

2. Intégration des énergies renouvelables . . . . .	631
2.1. Impact sur les réseaux de transport. . . . .	631
2.2. Impact sur les réseaux de distribution. . . . .	633
3. Impact du raccordement de la production décentralisée sur les réseaux de distribution. . . . .	634
3.1. Courant de défaut polyphasé et protection de départs . . . . .	635
3.2. Augmentation de la tension au point d'injection . . . . .	639
3.3. Protections de découplage. . . . .	644
3.4. Découplage des productions décentralisées raccordées en basse tension . . . . .	653
3.5. Indicateur de passage de défauts . . . . .	656
4. Réseaux intelligents . . . . .	657
4.1. Réseaux de communications . . . . .	657
4.2. Nouveaux services et usages . . . . .	659
4.3. Technologie . . . . .	663
4.4. Consommateur acteur . . . . .	667
5. Conclusion. . . . .	667
<b>Annexe</b> . . . . .	669
1. Exemple d'intelligence décentralisée : automatisme de boucle fermée moyenne tension . . . . .	669
2. Exemple d'appareillage intelligent : compensation intelligente de neutre. . . . .	671
<b>Index</b> . . . . .	673

**Michel Oddi** est ingénieur diplômé de l'École supérieure d'électricité. Au sein du groupe EDF, il a exercé durant quarante ans son activité dans le domaine des réseaux de distribution électrique, pour leur ingénierie, en tant qu'exploitant et en tant que chercheur senior. Il est l'auteur de plusieurs publications sur ces sujets et continue d'enseigner les réseaux électriques.

### Réseaux publics de distribution d'électricité - Fonctionnement et protection

Les « smart grids » ou « réseaux intelligents » sont présentés comme les réseaux électriques publics d'avenir, mais ils ne peuvent pas être créés ex-nihilo. Ils devront s'appuyer sur les réseaux existants, fruit de plus d'un siècle d'optimisation et de progrès successifs, avec leur réalité physique et leurs lois que l'ingénieur, concepteur ou exploitant, doit connaître pour les comprendre et les maîtriser.

Cet ouvrage revient ainsi aux sources des réseaux électriques publics de distribution. Il s'attache à expliquer comment ils se sont constitués au fil du temps, comment ils doivent être conçus pour garantir la qualité et la fiabilité de l'énergie distribuée ainsi que la sécurité des personnes et des biens, comment ils doivent être protégés et comment et sous quelles conditions ils pourraient évoluer en « smart grids ».

Fort d'une expérience de quarante ans dans le domaine des réseaux électriques publics de distribution et d'une connaissance étendue des pratiques à l'étranger, l'auteur a rassemblé l'ensemble de son savoir dans ce livre, dont l'organisation permet une progression graduelle tout au long de la lecture. Un rappel systématique des **principes théoriques et des théorèmes** de base facilitent la compréhension des explications et des calculs exposés. Les **normes applicables** aux réseaux publics de distribution sont citées et les **principales données numériques** relatives à ces réseaux sont fournies. Enfin, de nombreux **exemples concrets** permettent d'illustrer les différentes théories et méthodes qui y sont développées.

L'étudiant trouvera dans cet ouvrage, véritable référence en matière de réseaux publics de distribution électrique, une théorie complète de ces réseaux, le concepteur et l'exploitant y trouveront des réponses à leurs questions sur leur fonctionnement et leur protection ainsi que des explications sur les risques de dysfonctionnements ; quant à l'ingénieur chercheur développeur, il pourra s'enquérir de l'environnement dans lequel les produits dont il a la charge évolueront et des contraintes de toutes natures qu'ils seront susceptibles de subir.

