

Michel Lambert

LES RÉSEAUX D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE À HAUTE TENSION

De la conception à l'exploitation

DUNOD

Illustration de couverture : Ivan Kurmyshov/Shutterstock

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2023

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-085240-6

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Avant-propos	IX
Remerciements	XI
Introduction	1

Partie 1

Les aspects techniques et réglementaires

Chapitre 1 ■ La réglementation française	5
1.1 La pyramide des réglementations	5
1.1.1 L'organisation	5
1.1.2 Les documents de référence	6
1.2 L'arrêté technique et le Code du travail	7
1.2.1 L'arrêté technique du 17 mai 2001	7
1.2.2 Le Code du travail	7
1.3 La norme NF C 18-510	8
1.3.1 Un peu d'histoire	8
1.3.2 Les propriétés de la norme NF C 18-510	8
1.4 Les documents opérationnels	9
Chapitre 2 ■ Les réseaux d'énergie électrique, les réglages, les contraintes	11
2.1 Le concept de réseau	11
2.1.1 Généralités	11
2.1.2 Le schéma cible	12
2.1.3 Le système électrique	12
2.1.4 L'architecture	14
2.1.5 L'infrastructure	14
2.1.6 Les ressources	18
2.2 Les caractéristiques électriques	20
2.2.1 La fréquence du réseau	21
2.2.2 La tension de service	23
2.2.3 Les indices horaires du réseau	26
2.2.4 Le régime du neutre	28

2.3	Les mécanismes de régulation	30
2.3.1	La gestion des équilibres	30
2.3.2	Les réglages de la tension	37
2.4	Les éléments d'électrotechnique	46
2.4.1	Les notions concernant les composantes symétriques	46
2.4.2	La puissance de court-circuit	53
2.4.3	Les typologies de court-circuit	57
2.4.4	Les déséquilibres	58
2.5	Les contraintes de courant	64
2.5.1	Les effets des transits de charge	64
2.5.2	Les effets des courants de court-circuit	72
2.5.3	Les effets des courants transitoires d'enclenchement	73
2.6	Les contraintes de tension	74
2.6.1	La coordination de l'isolement	75
2.6.2	Les variations lentes de la tension	76
2.6.3	Les surtensions	78
Chapitre 3	■ Les éléments constitutifs des postes électriques	81
3.1	Les postes et l'exploitation du réseau	81
3.2	L'appareillage à haute tension	83
3.2.1	Le jeu de barres	83
3.2.2	Les sectionneurs	88
3.2.3	Les disjoncteurs	93
3.2.4	Les postes à isolation gazeuse	101
3.2.5	Les tableaux HTA	104
3.2.6	Les transformateurs	112
3.2.7	Les réducteurs de mesure	126
3.2.8	Les limiteurs de surtensions à front raide	145
3.3	Les matériels et les équipements à basse tension	151
3.3.1	Les auxiliaires électriques	151
3.3.2	Le contrôle commande d'un poste électrique	158
3.3.3	Les outils d'aide à l'exploitation des réseaux	161
3.4	Les prises et les circuits de terre	166
3.4.1	Les prises de terre	167
3.4.2	Le réseau général des terres	174
Chapitre 4	■ Les aspects techniques et réglementaires des régimes de neutre	181
4.1	Présentation d'un régime de neutre	181
4.1.1	La qualité de service	182
4.1.2	La sécurité	182
4.1.3	Le choix du régime de neutre	183

4.2 Les schémas des liaisons à la terre	183
4.2.1 Les référentiels	183
4.2.2 Les SLT en haute tension selon les normes	184
4.3 Les notions de régime de neutre	187
4.3.1 Le facteur de mise à la terre	187
4.3.2 Les propriétés des régimes de neutre	190
4.3.3 La cohérence entre les SLT et les régimes de neutre	192
4.4 La maîtrise des courants de défaut à la terre	193
4.4.1 La prise de terre de référence	194
4.4.2 Le capacitif homopolaire du réseau	195
4.4.3 Les matériels de mise à la terre des neutres	196
4.5 Les propriétés des régimes de neutre	200
4.6 Les tendances	202
4.7 Les conséquences	203
4.7.1 La conception et l'exploitation	203
4.7.2 La protection des biens et des personnes	203
4.7.3 La gestion des régimes de neutre	204
4.7.4 L'exploitation du réseau à défaut maintenu	205
4.7.5 Conclusion	206
Chapitre 5 ■ Les plans de protection du réseau	209
5.1 Généralités concernant les plans de protection	209
5.1.1 Les protections, plans de protection et systèmes de protection	210
5.1.2 Les principes généraux	212
5.2 Les protections d'exploitation	212
5.2.1 Les protections de surcharge	212
5.2.2 La protection de point neutre	224
5.2.3 Le contrôle des tensions	227
5.2.4 La protection de surexcitation	228
5.2.5 Les automates à manque de tension	230
5.3 Les protections de découplage des centrales électriques	232
5.3.1 Le cadre de cohérence	232
5.3.2 Le raccordement d'une centrale au réseau de distribution public HTA	233
5.3.3 Le raccordement d'une centrale aux réseaux publics HTB et THT	238
5.4 Les plans de protection contre les défauts d'isolement	245
5.4.1 Les typologies des défauts à la terre	245
5.4.2 Les typologies des défauts polyphasés	247
5.4.3 Les aspects réglementaires	251
5.4.4 Les propriétés essentielles d'un plan de protection	253

5.4.5	Le secours des protections défailtantes	256
5.4.6	L'organisation d'un plan de protection contre les défauts d'isolement	261

Partie 2

Les métiers de la conception et de l'exploitation

Chapitre 6 ■ La conception d'un réseau industriel 265

6.1	La recherche de la performance	265
6.2	L'examen de l'existant	266
6.2.1	L'alimentation de l'usine par le réseau public	267
6.2.2	La description du poste « Verrerie »	268
6.2.3	Le projet de modernisation	272
6.2.4	L'examen de la criticité de l'infrastructure	275
6.2.5	Les plans de protection	278
6.2.6	Conclusion	283

Chapitre 7 ■ Les considérations relatives à l'exploitation des transformateurs 285

7.1	Les considérations économiques	285
7.1.1	Les pertes constantes	285
7.1.2	Les pertes en charge	286
7.1.3	Les pertes provoquées par le système de refroidissement	287
7.1.4	La maîtrise des pertes techniques	288
7.2	Les considérations techniques	289
7.2.1	Les règles générales d'exploitation	289
7.2.2	Les régimes de surcharge	289
7.2.3	La maîtrise des courants d'enclenchement	290
7.3	La mise en parallèle de deux transformateurs	298
7.3.1	Les modes de raccordement	299
7.3.2	Le fonctionnement	303
7.3.3	L'impact sur les courants de court-circuit	307
7.3.4	L'impact sur le plan de protection	315
7.3.5	Conclusion	319
7.4	Les schémas d'exploitation des transformateurs	320
7.4.1	Présentation des schémas	320
7.4.2	Application	321

Chapitre 8 ■ La maintenance des postes électriques 329

8.1	Généralités concernant la maintenance	329
8.1.1	Définition	329

8.1.2	Les politiques de maintenance	330
8.1.3	L'organisation de la maintenance	331
8.1.4	La mise en œuvre d'une politique de maintenance	333
8.2	Les maintenances des transformateurs	334
8.2.1	La surveillance des ouvrages et des installations	334
8.2.2	Les niveaux de maintenance	337
8.2.3	Les points à mettre sous contrôle	339
8.3	La maintenance des systèmes de contrôle commande	350
8.3.1	Les niveaux de maintenance	350
8.3.2	Les modes opératoires	352
8.3.3	La maintenance d'une protection de masse cuve	353
8.3.4	Les essais sur des installations en service	358
Chapitre 9	■ Les accès au réseau, les acteurs, les travaux	367
9.1	Les personnels, leurs attributions	367
9.1.1	Les délégations	370
9.1.2	Les désignations	371
9.1.3	Les chargés d'exploitation	372
9.1.4	Le chargé de conduite	373
9.1.5	Les accès aux ouvrages ou aux installations électriques	374
9.1.6	Les limites de propriété et d'exploitation	375
9.2	Les manœuvres et les opérations	379
9.2.1	Les opérations d'ordre électrique	379
9.2.2	Les manœuvres	379
9.3	Les travaux	381
9.3.1	La préparation des travaux et l'analyse des risques	382
9.3.2	La phase d'information	383
9.3.3	Les travaux hors tension	383
9.3.4	La consignation d'un transformateur	386
9.3.5	Les autres consignations électriques pour travaux	392
9.3.6	Le déroulement des travaux	393
9.3.7	Les travaux dans l'environnement	397
9.3.8	Les travaux sous tension	403
9.4	Les documents d'accès	406
9.4.1	L'attestation de consignation	406
9.4.2	Les autorisations de travail et les attestations diverses	407
Chapitre 10	■ Les interventions en régime perturbé	409
10.1	Les principes généraux	409
10.1.1	La recherche de l'efficacité	409
10.1.2	Le reporting	410

10.1.3	Les réponses apportées à un régime perturbé	410
10.1.4	La supervision du réseau	411
10.1.5	La chronologie des actions	415
10.1.6	Le traitement d'une avarie de transformateur	420
10.1.7	Le traitement d'une alarme	424
10.2	Le point sur les aides à l'exploitation	426
10.2.1	L'organisation	426
10.2.2	Le traitement des informations	426
10.2.3	Les détecteurs de passage de courant de défaut	428
Chapitre 11	■ Le traitement des incidents	433
11.1	L'avarie sur un réseau public 20 kV	433
11.1.1	Présentation du réseau de distribution publique	433
11.1.2	Le traitement de l'incident	440
11.1.3	Le reporting	445
11.1.4	Les sujets qui doivent être éclaircis	448
11.2	L'avarie sur deux transformateurs 63 kV/20 kV	454
11.2.1	Les faits	454
11.2.2	La description des réseaux 63 kV et 20 kV	455
11.2.3	La simulation de l'événement	456
11.2.4	Les défaillances et les solutions	457
11.3	Conclusion	459
Chapitre 12	■ Le contrôle commande et la conduite des postes des réseaux étendus	463
12.1	L'histoire	463
12.1.1	Les évolutions	463
12.1.2	Les perspectives à court et moyen terme	469
12.2	L'infrastructure matérielle	471
12.2.1	Le système de conduite local	472
12.2.2	L'infrastructure locale de conduite numérique	475
12.3	Le traitement des informations	476
12.4	Le système de téléconduite	477
12.4.1	L'organisation	477
12.4.2	Les télécommunications	478
12.5	L'insertion des équipements du contrôle commande	480
12.5.1	Les perturbations, leurs origines et leurs conséquences	480
12.5.2	La compatibilité électromagnétique	482
Conclusion		489
Index		491

Avant-propos

Les usages de l'électricité ont pu se développer et se généraliser à partir du moment où l'énergie électrique a pu être acheminée en grande quantité là où les besoins se faisaient sentir. Le stockage de l'énergie ne pouvant être obtenu à des coûts acceptables que sur de faibles quantités, il a fallu faire en sorte que l'adaptation aux charges soit réalisée en temps réel, d'une manière synchrone et sécurisée. Les exploitants des réseaux d'énergie électrique ont eu alors l'obligation de maintenir les systèmes électriques en équilibre. Durant de nombreuses années, cela a été obtenu grâce à la réactivité des personnels d'exploitation. Par la suite, les concepteurs ont procédé à l'automatisation des réseaux. Des équipements destinés aux réglages, à la défense et à la sécurisation des systèmes électriques ont ainsi été déployés sur les infrastructures. Durant cette période qui s'est étalée sur plusieurs dizaines d'années, le personnel d'exploitation a été chargé de la conduite, de la pérennisation des investissements, de la sécurisation des réseaux ainsi que de la sécurité des biens et des personnes sur et dans l'environnement des ouvrages ou des installations électriques. Aujourd'hui, les moyens déployés en vue de réaliser des réseaux « intelligents¹ » permettent d'envisager des progrès importants en matière de résilience et de réactivité.

Pour fournir aux usagers un produit électricité de qualité, un réseau électrique doit disposer d'une architecture conçue en cohérence et servie par des professionnels expérimentés. Pour satisfaire aux exigences des usagers et des personnels d'exploitation, le concepteur d'un réseau d'énergie électrique doit mettre à la disposition des exploitants des ressources rapidement libérables sur une infrastructure observable, manœuvrable et maintenable. Le tout doit être adossé à des plans de protection destinés à assurer l'élimination ultime des désordres ainsi que le retour rapide aux équilibres.

Ce livre décrit les principes utilisés pour la conception et l'exploitation des réseaux d'énergie électrique à haute tension. Il présente par ailleurs les métiers de l'exploitation ainsi que les obligations et le positionnement des acteurs dans l'organisation.

¹ Le *smart grid*.

Ce n'est ni un guide technique ni un référentiel consacré à l'exploitation des réseaux d'énergie électrique. Il existe des publications éditées pour cela sous forme de normes, de consignes et de référentiels d'entreprises. Il a été conçu à l'intention des concepteurs et des personnels participant à l'exploitation des réseaux à haute tension qui débutent dans leur activité. Rédigé à partir de mes expériences, il sera particulièrement utile pour comprendre les thèmes développés par les experts. Il apportera aux professionnels des éclaircissements et des compléments d'informations sur des sujets qui ne leur sont pas forcément très accessibles. Il les aidera également à avoir une vision globale et cohérente des métiers de l'exploitation des réseaux électriques à haute tension, qu'ils soient publics ou industriels.

Il reprend et synthétise les thèmes développés dans mes précédents livres parus aux éditions Dunod :

- ▶ *Les régimes de neutre et les schémas des liaisons à la terre*
- ▶ *Les transformateurs électriques de puissance, fonctionnement, mise en œuvre et exploitation*
- ▶ *Les plans de protection des réseaux à haute tension*

Il comporte deux parties.

1^{re} partie Les aspects techniques et réglementaires

- ▶ Chapitre 1 : La réglementation française
- ▶ Chapitre 2 : Les réseaux d'énergie électrique, les réglages, les contraintes
- ▶ Chapitre 3 : Les éléments constitutifs des postes électriques
- ▶ Chapitre 4 : Les aspects techniques et réglementaires des régimes de neutre
- ▶ Chapitre 5 : Les plans de protection du réseau

2^e partie Les métiers de la conception et de l'exploitation

- ▶ Chapitre 6 : La conception d'un réseau industriel
- ▶ Chapitre 7 : Les considérations relatives à l'exploitation des transformateurs
- ▶ Chapitre 8 : La maintenance des postes électriques
- ▶ Chapitre 9 : Les accès au réseau, les acteurs, les travaux
- ▶ Chapitre 10 : Les interventions en régime perturbé
- ▶ Chapitre 11 : Le traitement des incidents
- ▶ Chapitre 12 : Le contrôle commande et la conduite des postes des réseaux étendu

Remerciements

Je remercie les constructeurs, les exploitants et les concepteurs qui, durant de nombreuses années, m'ont apporté aide et assistance dans l'accomplissement de mes missions, avec qui j'ai eu le plaisir de dialoguer ou de travailler et qui m'ont fait partager leurs expériences.

Convention d'écriture appliquée dans l'ouvrage

- ▶ δ : coefficient de surtension temporaire
- ▶ F : facteur de mise à la terre Z_0/Z_d
- ▶ HTA : tension de service supérieure à 1 kV et inférieure à 50 kV
- ▶ HTB : tension de service supérieure ou égale à 50 kV
- ▶ I_1 : intensité phase 1
- ▶ I_2 : intensité phase 2
- ▶ I_3 : intensité phase 3
- ▶ I_{k_1} : courant à la terre pour un court-circuit monophasé
- ▶ I_{k_2} : courant dans le défaut pour un court-circuit biphasé
- ▶ $I_{k_{2E}}$: courant de court-circuit dans les phases pour un court-circuit biphasé à la terre
- ▶ I_{k_3} : courant dans le défaut pour un court-circuit triphasé
- ▶ $I_{k_{E2E}}$: courant dans le défaut à la terre pour un court-circuit biphasé à la terre
- ▶ P : puissance active
- ▶ P_0 : puissance active homopolaire
- ▶ P_r : puissance active résiduelle
- ▶ Q : puissance réactive
- ▶ R_m : résistance de la prise de terre des masses
- ▶ R_n : résistance de la prise de terre des neutres
- ▶ S : puissance apparente
- ▶ S_{cc} : valeur de la puissance de court-circuit
- ▶ S_{cc_1} : valeur de la puissance de court-circuit au primaire d'un transformateur
- ▶ S_{cc_2} : valeur de la puissance de court-circuit au secondaire d'un transformateur
- ▶ S_{cc_T} : valeur de la puissance de court-circuit d'un transformateur
- ▶ S_n : valeur de la puissance nominale
- ▶ TGBT : tableau général à basse tension
- ▶ THT : tension de service supérieure ou égale à 150 kV
- ▶ U_{cc} : tension de court-circuit d'un transformateur
- ▶ U_n : tension composée nominale ou spécifiée
- ▶ U_{np} : tension nominale primaire d'un transformateur
- ▶ U_{ns} : tension nominale secondaire d'un transformateur

- ▶ U_s : tension de service
- ▶ U_s : tension de service du réseau
- ▶ V_1 : tension simple phase 1
- ▶ V_2 : tension simple phase 2
- ▶ V_3 : tension simple phase 3
- ▶ Vd_1 : composante directe de tension phase 1
- ▶ Vi_1 : composante inverse de tension phase 1
- ▶ Vn : tension simple nominale ou spécifiée au point de défaut
- ▶ Vo_1 : composante homopolaire de tension phase 1
- ▶ Xi : réactance inverse
- ▶ Zd : impédance directe
- ▶ Zi : impédance inverse
- ▶ ZN : impédance résiduelle du dispositif de mise à la terre du neutre
- ▶ Zo : impédance homopolaire
- ▶ ZoN : impédance homopolaire du dispositif de mise à la terre du neutre
- ▶ \mathfrak{R} : réglage d'une protection
- ▶ \mathfrak{R}_{51} : réglage d'une protection à maximum d'intensité
- ▶ \mathfrak{R}_{59N} : réglage d'une protection 59N
- ▶ \mathfrak{R}_{10} : réglage d'une protection à maximum de courant homopolaire

Liste des acronymes utilisés

- ▶ ADD : automatisme de défaillance disjoncteur (50 BF)
- ▶ AFNOR : Association française de normalisation
- ▶ ANSI : *Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms and Contact Designations*
- ▶ BCC : bureau central de conduite
- ▶ BPN : bobine triphasée de mise à la terre du neutre
- ▶ CCTP : cahiers des clauses techniques particulières
- ▶ CEI : Commission électrotechnique internationale
- ▶ CENELEC : Comité européen de normalisation en électrotechnique et en électronique
- ▶ CNES : Centre national d'exploitation du système électrique RTE
- ▶ CRE : Centre régional d'exploitation RTE
- ▶ DGPT : dispositif général de protection de transformateur (équivalent à DMCR)

- ▶ DGBT : disjoncteur de protection générale à basse tension
- ▶ DMCR : dispositif de mesure et de contrôle de régime (équivalent à DGPT)
- ▶ EDF : Électricité de France
- ▶ EMS : enregistreur de manœuvres et de signalisations
- ▶ ENEDIS : gestionnaire des réseaux publics de distribution français
- ▶ ERDF : ancienne appellation d'ENEDIS.
- ▶ GIS : *gas-insulated substation* (appellation anglo-saxonne de PSEM)
- ▶ GMAO : gestion de la maintenance assistée par ordinateur
- ▶ GMR : Groupe de maintenance réseau RTE
- ▶ HTA : tensions de service comprises entre [1 000 V et 50 kV]
- ▶ HTB1 : tension de service comprise entre [50 kV et 150 kV]
- ▶ HTB2 : tension de service 150 kV et 225 kV
- ▶ HTB3 : tension de service 400 kV et au delà de 400 kV
- ▶ IEEE : *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
- ▶ IMAP : intensité maximale autorisée en permanence
- ▶ IPN : inductance monophasée de point neutre
- ▶ IUMI : intervention urgente manœuvre interdite
- ▶ OCR : organe de coupure en réseau
- ▶ ONAN : circulation d'huile naturelle et refroidissement naturel
- ▶ ONAF : circulation d'huile naturelle et refroidissement forcé
- ▶ ODAF : circulation d'huile dirigée et refroidissement forcé
- ▶ PCC : puissance de court-circuit en un point
- ▶ PC : poste de commande
- ▶ PCG : pupitre de commande groupé
- ▶ PA : poste asservi
- ▶ PSEM : poste sous enveloppe métallique et sous pression de gaz (GIS)
- ▶ RPN : résistance de point neutre
- ▶ RTU : poste satellite
- ▶ SCADA : *Supervisory control and data acquisition*
- ▶ SLT: schéma des liaisons à la terre (associé au régime de neutre)
- ▶ SRB : interrupteur sectionneur (sectionneur à rupture brusque)
- ▶ RTE : gestionnaire des réseaux de transport et de répartition français
- ▶ TGBT : tableau général à basse tension
- ▶ THT : regroupe HTB2 et HTB3
- ▶ TC : transformateur de courant
- ▶ TPN : transformateur de point neutre

- ▶ TPL : tourner- pousser lumineux
- ▶ TSA : transformateur des services auxiliaires
- ▶ TSEM : tableau sous enveloppe métallique
- ▶ UTE : union technique de l'électricité
- ▶ TT : transformateur de tension
- ▶ WAN : *wide area network*

Les codes ANSI des fonctions de protection

- ▶ 21 : protection à minimum d'impédance
- ▶ 27 : protection à minimum de tension
- ▶ 47 : protection à maximum de tension inverse
- ▶ 50 : protection ampèremétrique non temporisée
- ▶ 51 : protection ampèremétrique temporisée
- ▶ 51G : protection ampèremétrique résiduelle alimentée par un tore homopolaire
- ▶ 51N : protection ampèremétrique résiduelle alimentée par trois TC
- ▶ 50 BF : contrôle du déclenchement du disjoncteur
- ▶ 59 : maximum de tension
- ▶ 59N : maximum de tension résiduelle
- ▶ 64 REF : protection différentielle de terre restreinte
- ▶ 67W : protection wattmétrique homopolaire
- ▶ 67G : protection directionnelle de terre alimentée par un tore homopolaire
- ▶ 67N : protection directionnelle de terre alimentée par trois TC
- ▶ 87 : protection différentielle

Introduction

La performance d'un réseau électrique dépend de la fiabilité présentée par ses différents constituants, par la manière de les concevoir (cohérence), de les construire (règles de l'art) et de les exploiter (métiers).

Durant la première moitié du xx^e siècle, les réseaux d'énergie électrique ont été conçus pour permettre aux personnes qui en faisaient la demande d'accéder à l'énergie électrique. La préoccupation des exploitants allait alors vers la recherche d'un compromis entre les investissements et la sûreté d'approvisionnement. Par la suite, l'évolution des exigences a provoqué une mutation dans la manière de les concevoir et de les exploiter. La continuité de la fourniture, la qualité de l'onde électrique, la sécurité des biens et des personnes ainsi que la préservation de l'environnement ont pris une place importante dans la conception et la réalisation des réseaux d'énergie électrique. Aujourd'hui, la nécessité de maîtriser les coûts est en passe de s'imposer. Les principes qui régissent la conception et l'exploitation des réseaux d'énergie électriques sont les réponses aux contraintes techniques et réglementaires. Un réseau d'énergie électrique doit être manœuvrable, observable et maintenable. Bien évidemment les spécifications des matériels doivent être conformes aux exigences de l'exploitation et aux contraintes évoquées précédemment.

L'exploitation d'un réseau participe à la pérennité des investissements. C'est la raison pour laquelle il revient au chef d'établissement d'établir les politiques de maintenance et de renouvellement des matériels et des équipements. Il doit veiller par ailleurs à la sécurité des biens et des personnes sur et dans l'environnement du réseau. Les grandeurs électriques mises en jeu doivent être maîtrisées en cohérence avec les obligations techniques ou réglementaires, et cela au meilleur coût. Pour cela, il doit adapter les schémas d'exploitation en fonction des contraintes. Dans tous les cas, l'exploitant doit faire en sorte que la qualité de service perçue par l'utilisateur domestique ou industriel soit conforme à la qualité de service attendue. L'exploitant doit

donc être un professionnel développant une capacité d'analyse, de réaction et de proposition. Par ailleurs, les métiers de l'exploitation des réseaux d'énergie électrique requièrent de la part des acteurs une pratique commune. Toute personne qui participe à l'exploitation d'un réseau d'énergie électrique doit pouvoir se référer à des documents constituant le socle des règles d'exploitation.

1

LES ASPECTS TECHNIQUES ET RÉGLEMENTAIRES

Chapitre 1	La réglementation française	5
Chapitre 2	Les réseaux d'énergie électrique, les réglages, les contraintes	11
Chapitre 3	Les éléments constitutifs des postes électriques	81
Chapitre 4	Les aspects techniques et réglementaires des régimes de neutre	181
Chapitre 5	Les plans de protection du réseau	209

Chapitre 1

La réglementation française

En France, les règles relatives à la sécurité des personnels intervenant sur et dans l'environnement des ouvrages ou des installations électriques sont précisées dans la norme NF C 18-510 qui est la référence en matière de sécurité électrique. À partir de ce document, les entreprises exploitantes ou intervenantes peuvent rédiger des référentiels permettant d'ajuster les règles en cohérence avec les spécificités de leur environnement électrique.

1.1 La pyramide des réglementations

En matière de conception, d'exploitation et de sécurité électrique, les documents mis à la disposition des personnels d'exploitation des réseaux d'énergie électrique prennent leur source dans les décisions de la Communauté européenne transposées dans les lois, décrets et arrêtés de l'État français. Ces décisions sont publiées en version papier ou numérique par l'AFNOR¹ et Légifrance.

1.1.1 L'organisation

La conception des ouvrages et des installations électriques ainsi que la prévention des risques dans les environnements électriques reposent sur un ensemble de textes réglementaires. Au sein d'une entreprise gestionnaire d'un réseau électrique, la réglementation est constituée d'un ensemble de documents organisés d'une manière pyramidale. De fait, un texte ou un document de niveau inférieur ne peut prendre le pas sur un texte ou un document de niveau supérieur.

¹ L'Association française de normalisation représente la France auprès de l'Organisation internationale de normalisation et du Comité européen de normalisation.

Par définition et dans ce contexte, un texte réglementaire est un document officiel rédigé par les pouvoirs publics et mis en œuvre en cohérence par les responsables hiérarchiques des entreprises exploitantes de réseaux électriques dans le but de protéger l’environnement et de garantir la sécurité des biens et des personnes.

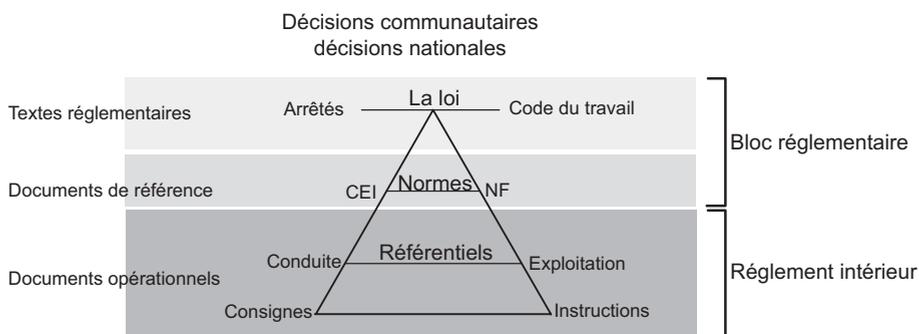


Figure 1.1 – Pyramide de la réglementation

Les textes et les documents réglementaires sont publiés au niveau national par les organismes mandatés par les pouvoirs publics.

1.1.2 Les documents de référence

- ▶ En ce qui concerne la conception des ouvrages et des installations à haute tension, on peut citer :
 - l’arrêté technique du 17 mai 2001 ;
 - les normes NF C 13-100 et NF C 13-200.
- ▶ En ce qui concerne la prévention des risques électriques et la sécurité des personnels exerçant une activité sur et dans l’environnement des conducteurs et des pièces nues maintenues sous tension, les trois principaux documents de référence sont :
 - le Code du travail ;
 - l’arrêté du 9 juillet 2013 ;
 - la norme NF C 18-510.

Le *Journal officiel* (journal-officiel.gouv.fr) publie les textes législatifs et réglementaires de la République française. Depuis le 1^{er} janvier 2016, ils sont consultables sur le site Légifrance (legifrance.gouv.fr). L’Association française de normalisation (AFNOR) représente la France dans les organismes internationaux de normalisation. Elle participe également aux travaux du Comité

européen de normalisation en électronique et en électrotechnique² et de la Commission électrotechnique internationale³. Elle publie sous le marquage NF (norme française) les documents de normalisation (boutique.afnor.org). Elle est placée sous la tutelle du ministère chargé de l'Industrie.

1.2 L'arrêté technique et le Code du travail

L'arrêté technique et le Code du travail se partagent les prescriptions en matière de prévention des risques d'origine électrique.

1.2.1 L'arrêté technique du 17 mai 2001

L'arrêté du 17 mai 2001 fixe les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique. Il s'agit principalement :

- ▶ des ouvrages faisant partie de la concession d'un réseau d'alimentation générale, d'une concession de distribution publique ou d'un réseau exploité en régie, ainsi que des lignes de raccordement aux centrales de production ;
- ▶ des ouvrages faisant partie d'installations des clients lorsqu'ils doivent être établis sous le régime de l'autorisation ou de la permission de voirie ;
- ▶ des installations de traction électrique.

C'est l'arrêté technique du 17 mai 2001 qui est à l'origine des spécifications relatives aux ouvrages des réseaux à haute et basse tension.

Cet arrêté spécifie notamment les distances d'éloignement en fonction de la tension de service :

- ▶ entre un conducteur ou une pièce nue et la terre ;
- ▶ entre deux conducteurs ou deux pièces nues de potentiels différents.

1.2.2 Le Code du travail

La prévention des risques électriques relève pour l'essentiel de la réglementation du travail. Le Code du travail fixe par exemple les règles à respecter lors des opérations ou des travaux au voisinage des installations électriques du domaine privé.

² CENELEC.

³ CEI.

Il est complété par l'arrêté du 9 juillet 2013 qui fixe les distances limites des zones de voisinage et spécifie les conditions d'exécution des travaux à proximité des installations électriques.

1.3 La norme NF C 18-510

Le document édité en 2012 n'a pas d'équivalent à la CEI et au CENELEC. Il reprend et complète les dispositions de la publication UTE C 18-510. Les modalités d'application seront présentées au chapitre 9.

1.3.1 Un peu d'histoire

Dans les années 1960, les conditions d'exécution des travaux sur les ouvrages et les installations électriques étaient fixées par deux publications.

- ▶ La publication UTE C 18-513 concernait les travaux hors tension.

Dans ce cadre, un ouvrage et une installation étaient considérés comme étant hors tension que s'ils étaient consignés.

- ▶ La publication UTE C 18-520 traitait des travaux sous tension.

Ces publications ont été regroupées dans les années 1970 dans une publication UTE C 18-510 qui a subi des évolutions tout au long des décennies pour devenir une norme en 2012 qui sera rendue en 2014 d'application obligatoire.

*Bien qu'une norme soit par principe d'application volontaire, les pouvoirs publics peuvent, par exception, rendre tout ou partie d'une norme d'application obligatoire. Il est cependant nécessaire que le texte soit librement accessible et gratuit. Par une décision du 10 février 2016, le Conseil d'État a annulé l'arrêté du 19 juin 2014 qui rendait obligatoire la norme NF C 18-510 intitulée « **Opérations sur les ouvrages et installations électriques, et dans un environnement électrique – Prévention du risque électrique** ». Le document est en effet commercialisé par l'AFNOR.*

1.3.2 Les propriétés de la norme NF C 18-510

La norme de janvier 2012 spécifie les mesures de prévention qui doivent être prises en vue d'assurer la sécurité des personnels contre les dangers d'origine électrique lorsqu'ils effectuent un travail⁴ sur ou dans l'environnement d'un ouvrage ou d'une installation électrique en service, sous tension, hors tension ou consigné :

⁴ Travail d'ordre électrique ou travail d'ordre non électrique.

- ▶ elle met au premier plan l'organisation du travail quant à l'analyse du risque et la préparation du travail ;
- ▶ elle actualise les principes généraux ;
- ▶ elle a un caractère opératoire ;
- ▶ elle intègre et officialise certaines pratiques d'exploitation ;
- ▶ elle introduit des critères technologiques ;
- ▶ elle décrit la chaîne de responsabilité.

Elle est en permanence mise à jour.

À la suite de la parution de l'arrêté du 7 avril 2021, certaines dispositions dans le texte de la norme NF C 18-510 complétée par son amendement 1 sont à clarifier, sans remettre en question les éléments essentiels de son contenu. De ce fait, la date limite d'application de la première version a été fixée à février 2023. À partir de mars 2023, la nouvelle version a pris la relève.

Les spécifications relatives à la conduite des ouvrages et des installations sont précisées dans les référentiels de conduite et d'exploitation élaborés par l'exploitant gestionnaire du réseau.

1.4 Les documents opérationnels

Ces documents doivent être élaborés en cohérence avec les décisions du législateur. Que ce soit dans le cadre de la conception (la construction d'un poste à haute tension par exemple), de la conduite, de la sécurité ou de l'exploitation. Les spécifications doivent être mises en cohérence avec l'esprit de la norme NF C 18-510.

Les documents traitant de la conception des ouvrages sont représentés par les guides techniques.

Les prescriptions concernant la prévention et la sécurité sont publiées dans des documents relatifs aux travaux et aux opérations sur et dans l'environnement des ouvrages ou des installations électriques maintenues ou non sous tension.

Celles traitant des opérations de conduite et d'exploitation sur les réseaux d'énergie électrique sont précisées sous forme de consignes dont le but est d'optimiser le fonctionnement des réseaux et de préparer les ouvrages ou les installations aux opérations de consignations ou de travaux sous tension.