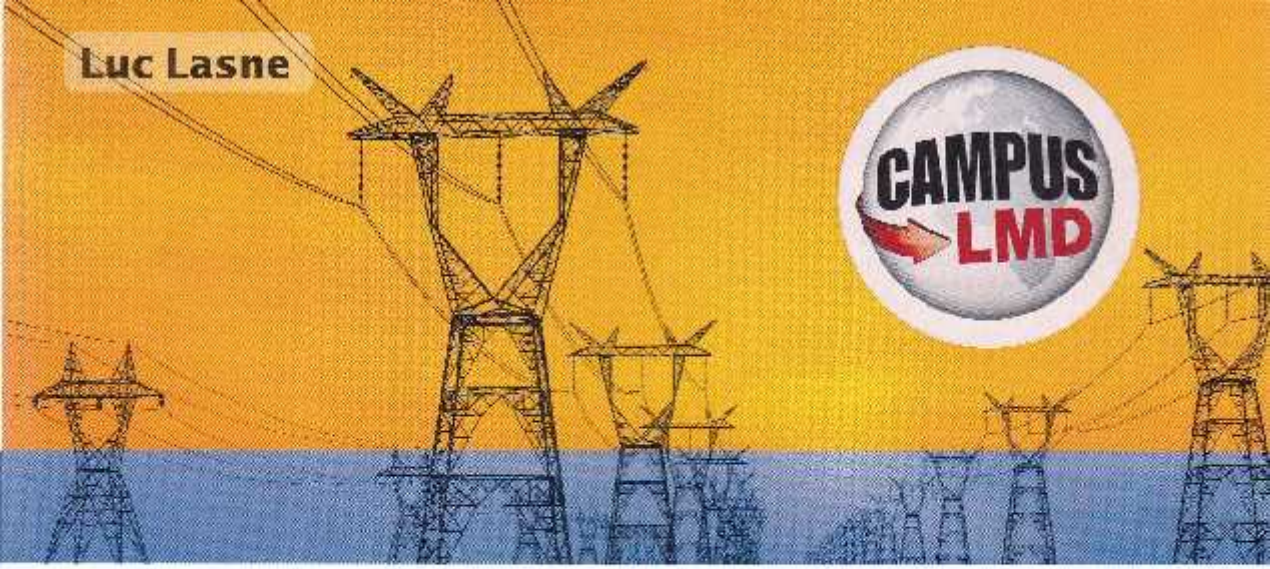
Luc Lasne



CAMPUS LMD

# Électrotechnique et énergie électrique

## 2e édition

- IUT/BTS
- Licences
- Écoles d'ingénieurs
- CAPES/CAPET

DUNOD

# Table des matières


**PRÉFACE** v

**AVANT-PROPOS** xv

**REMERCIEMENTS** xvi

**INTRODUCTION** 1

1 Qu'est ce que l'électrotechnique ? ..... 1

2 Quelle est aujourd'hui la place de l'énergie électrique parmi les autres énergies ? ..... 2

3 Quels sont les domaines concernés par l'électrotechnique ? ..... 3

4 Quels sont les programmes universitaires liés à l'ingénierie électrotechnique ? ..... 3

5 Comment tester ses connaissances ? ..... 4

CHAPITRE 1 • **RAPPELS ET GRANDEURS SINUSOÏDALES** ..... 5

1.1 Lois de base et conventions des dipôles électriques ..... 5

1.2 Récepteurs électriques linéaires ..... 6

1.3 Régime continu et régimes variables ..... 7

1.4 Valeurs caractéristiques des grandeurs périodiques quelconques ... 8

1.5 Le régime sinusoïdal et sa représentation complexe (vectorielle) ... 9

1.6 Généralisation du théorème de Thévenin ..... 16

Exercices ..... 17

CHAPITRE 2 • **LES PUISSANCES ÉLECTRIQUES** ..... 20

2.1 Énergie et puissance ..... 20


© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit

2.2 Généralités sur la notion de puissance en électrotechnique ..... 22
2.3 La puissance active en régime continu ..... 23
2.4 Puissances électriques en régime alternatif sinusoïdal ..... 23
2.5 Puissance apparente complexe, puissances associées aux récepteurs communs rencontrés en électrotechnique ..... 26
2.6 Théorème de Boucherot et triangle des puissances ..... 27
2.7 Facteur de puissance, compensation de la puissance réactive ..... 28
2.8 Puissances électriques en régime périodique non-sinusoïdal ..... 30
2.9 Mesure des puissances électriques ..... 32
Exercices ..... 34

CHAPITRE 3 • **CIRCUITS À COURANTS ALTERNATIFS TRIPHASÉS** ..... 37
3.1 Introduction ..... 37
3.2 Système de tensions triphasé équilibré direct (TED) ..... 38
3.3 Générateur triphasé et différents couplages des phases ..... 40
3.4 Charges triphasées, équilibre et déséquilibre ..... 42
3.5 Puissances en triphasé ..... 44
3.6 Équivalence de charges, transformations « Y/D » ..... 46
3.7 Neutre, neutre fictif et schéma équivalent monophasé ..... 46
3.8 Mesures de puissances en triphasé ..... 49
Exercices ..... 50

CHAPITRE 4 • **SYSTÈMES TRIPHASÉS DÉSÉQUILIBRÉS, RÉSOLUTIONS MATRICIELLES ET COMPOSANTES SYMÉTRIQUES** ..... 52
4.1 Notion de déséquilibre local et charges à neutre relié ..... 52
4.2 Déséquilibre local sur charge à neutre non relié ..... 54
4.3 Exemple : Charge déséquilibrée et rupture de neutre ..... 57
4.4 Problématique générale des déséquilibres ..... 59
4.5 Présentation des composantes symétriques ..... 59
4.6 Constructions graphiques et remarques importantes ..... 62

4.7 Composantes symétriques des grandeurs triphasées ..... 64
4.8 Applications des composantes symétriques ..... 66
Exercices ..... 70

CHAPITRE 5 • **MAGNÉTISME, MATÉRIAUX ET CIRCUITS MAGNÉTIQUES** ..... 73
5.1 Le magnétisme : le phénomène et ses grandeurs ..... 73
5.2 Classification des matériaux magnétiques ..... 74
5.3 Les matériaux ferro-magnétiques ..... 75
5.4 Notions incontournables et théorème d'Ampère ..... 78
5.5 Les circuits magnétiques ..... 82
5.6 Limites de la théorie des C.M. et logiciels de calcul de flux ..... 87
Exercices ..... 89

CHAPITRE 6 • **CIRCUITS MAGNÉTIQUES EN RÉGIME ALTERNATIF SINUSOÏDAL** .... 91
6.1 Introduction ..... 91
6.2 Relations importantes en régimes alternatifs ..... 91
6.3 Pertes et particularités liées aux matériaux réels ..... 93
6.4 Notions complémentaires ..... 95
6.5 Modèle linéaire d'une bobine à noyau de fer ..... 98
Exercice ..... 99

CHAPITRE 7 • **CIRCUITS MAGNÉTIQUES À AIMANTS PERMANENTS** ..... 101
7.1 Point de fonctionnement d'un aimant permanent inséré dans un circuit magnétique ..... 101
7.2 Critère de choix d'un aimant permanent ..... 103
7.3 Caractéristiques particulières des différents types d'aimants et utilisations classiques ..... 104
7.4 Détermination pratique des dimensions d'un aimant permanent... 105
Exercice ..... 106

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit

CHAPITRE 8 • **ÉNERGIES, PUISSANCES ET FORCES LIÉES AU MAGNÉTISME, MÉTHODE DES TRAVAUX VIRTUELS** ..... 107

8.1 Formules générales des énergies d'un matériau aimanté ..... 107

8.2 Variations d'énergie, puissance et force ..... 110

8.3 Principe de réluctance minimale ..... 112

8.4 Méthode des travaux virtuels ..... 113

Exercices ..... 117

CHAPITRE 9 • **TRANSFORMATEURS** ..... 120

9.1 Transformateur monophasé idéal ..... 120

9.2 Mieux comprendre le transformateur ..... 123

9.3 Le transformateur monophasé réel et son modèle ..... 124

9.4 Grandeurs associées au schéma et chute de tension au secondaire 126

9.5 Notions complémentaires associées au transformateur réel ..... 128

9.6 Transformateurs triphasés ..... 131

9.7 Impédances associées aux transformateurs et ordres de grandeur . 134

9.8 Transformateurs en parallèle ..... 138

9.9 Autotransformateurs ..... 140

Exercices ..... 141

CHAPITRE 10 • **MATÉRIAUX ISOLANTS ET CONDENSATEURS** ..... 145

10.1 Introduction ..... 145

10.2 Matériaux isolants ..... 145

10.3 Approche physique du condensateur ..... 147

10.4 Formules courant/tension et énergies ..... 149

10.5 Schéma équivalent et comportement en fréquence ..... 150

10.6 Technologies de construction des condensateurs ..... 151

10.7 Applications classiques du domaine de l'énergie ..... 153

10.8 Supercondensateurs ..... 157

CHAPITRE 14 • **MACHINES ASYNCHRONES** ..... 224

14.1 Principes et relations générales ..... 224

14.2 Fonctionnement à tension et fréquence constantes ..... 230

14.3 Démarrage des moteurs asynchrones ..... 234

14.4 Variation de vitesse des moteurs asynchrones ..... 235

14.5 Fonctionnement en génératrice et en frein ..... 241

14.6 Moteurs asynchrones monophasés ..... 242

Exercices ..... 243

CHAPITRE 15 • **TRANSFORMATIONS MATRICIELLES. MODÈLES « D, Q » DES MACHINES À COURANTS ALTERNATIFS TRIPHASÉS** ..... 247

15.1 Matrices d'impédances et d'inductances ..... 247

15.2 Transformations matricielles classiques ..... 248

15.3 La transformée de Park et le repère du champ tournant ..... 250

15.4 Modèle « d,q » des machines synchrones ..... 253

15.5 Modèle « d,q » des machines asynchrones ..... 258

15.6 Conclusion sur les modèles *d,q* ..... 262

CHAPITRE 16 • **HARMONIQUES ET RÉGIMES DÉFORMÉS** ..... 264

16.1 Bases mathématiques de l'étude des harmoniques ..... 265

16.2 Expressions des puissances en régime déformé ..... 271

16.3 Sources, propagation et conséquences des harmoniques ..... 274

16.4 Harmoniques pairs et impairs, courant de neutre ..... 275

16.5 Réduction et compensation des harmoniques ..... 278

Exercices ..... 278

CHAPITRE 17 • **LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES** ..... 282

17.1 Introduction ..... 282

17.2 Structure générale des réseaux électriques ..... 282

17.3 Production de l'énergie électrique ..... 283
17.4 Caractéristiques générales du transport et de la distribution ..... 285
17.5 Principes fondateurs des réseaux électriques ..... 288
17.6 Phénomènes liés au fonctionnement des réseaux électriques ..... 292
17.7 Stratégie de fonctionnement des réseaux ..... 297
17.8 Outils de modélisation et d'étude des réseaux électriques ..... 302
17.9 Exemples de calculs liés aux modélisations ..... 307

**CONCLUSION** 311

**BIBLIOGRAPHIE ET LIENS** 313

**INDEX** 315