

IUT | LICENCE | ÉCOLES D'INGÉNIEURS

SCIENCES SUP

Cours avec  
exercices  
corrigés

Luc Lasne

# Énergie électrique

Électrotechnique – Magnétisme  
Machines – Réseaux

3<sup>e</sup> ÉDITION

DUNOD

# Table des matières

<b>PRÉFACE</b>	v
<b>AVANT-PROPOS</b>	xv
<b>REMERCIEMENTS</b>	xvii
<b>INTRODUCTION</b>	1
1 Qu'est ce que l'énergie électrique ? .....	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'énergie électrique ? .....	3
4 Quels sont les programmes universitaires liés à l'ingénierie électrotechnique ? .....	3
5 Comment tester ses connaissances ? .....	4
<b>CHAPITRE 1 • RAPPELS ET GRANDEURS SINUSOÏDALES</b> .....	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) ...	10
1.6 Généralisation du théorème de Thévenin .....	16
Exercices .....	17
<b>CHAPITRE 2 • LES PUISSANCES ÉLECTRIQUES</b> .....	20
2.1 Énergie et puissance .....	20

2.2	Généralités sur la notion de puissance.....	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.....	28
2.7	Facteur de puissance, compensation de la puissance réactive.....	29
2.8	Puissances électriques en régime périodique non-sinusoïdal.....	31
2.9	Mesure des puissances électriques.....	33
	Exercices.....	34
<b>CHAPITRE 3 • CIRCUITS À COURANTS ALTERNATIFS TRIPHASÉS.....</b>		<b>37</b>
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
<b>CHAPITRE 4 • SYSTÈMES TRIPHASÉS DÉSÉQUILIBRÉS, RÉOLUTIONS MATRICIELLES ET COMPOSANTES SYMÉTRIQUES.....</b>		<b>52</b>
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
<b>CHAPITRE 5 • MAGNÉTISME, MATÉRIAUX ET CIRCUITS MAGNÉTIQUES .....</b>		<b>73</b>
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
<b>CHAPITRE 6 • CIRCUITS MAGNÉTIQUES EN RÉGIME ALTERNATIF SINUSOÏDAL .....</b>		<b>91</b>
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
6.6	Loi de Lenz et équations générales des couplages magnétiques linéaires .....	99
6.7	Modélisation générale des couplages linéaires .....	102
	Exercices .....	104
<b>CHAPITRE 7 • CIRCUITS MAGNÉTIQUES À AIMANTS PERMANENTS .....</b>		<b>108</b>
7.1	Point de fonctionnement d'un aimant permanent inséré dans un circuit magnétique .....	108
7.2	Critère de choix d'un aimant permanent .....	110
7.3	Caractéristiques particulières des différents types d'aimants et utilisations classiques .....	111
7.4	Détermination pratique des dimensions d'un aimant permanent...	112

4.7	Composantes symétriques des grandeurs triphasées .....	64
4.8	Applications des composantes symétriques .....	66
	Exercices .....	70
<b>CHAPITRE 5 • MAGNÉTISME, MATÉRIAUX ET CIRCUITS MAGNÉTIQUES .....</b>		<b>73</b>
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
<b>CHAPITRE 6 • CIRCUITS MAGNÉTIQUES EN RÉGIME ALTERNATIF SINUSOÏDAL .....</b>		<b>91</b>
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
6.6	Loi de Lenz et équations générales des couplages magnétiques linéaires .....	99
6.7	Modélisation générale des couplages linéaires .....	102
	Exercices .....	104
<b>CHAPITRE 7 • CIRCUITS MAGNÉTIQUES À AIMANTS PERMANENTS .....</b>		<b>108</b>
7.1	Point de fonctionnement d'un aimant permanent inséré dans un circuit magnétique .....	108
7.2	Critère de choix d'un aimant permanent .....	110
7.3	Caractéristiques particulières des différents types d'aimants et utilisations classiques .....	111
7.4	Détermination pratique des dimensions d'un aimant permanent .....	112

Exercice .....	113
<b>CHAPITRE 8 • ÉNERGIES, PUISSANCES ET FORCES LIÉES AU MAGNÉTISME, MÉTHODE DES TRAVAUX VIRTUELS .....</b>	<b>114</b>
8.1 Formules générales des énergies d'un matériau aimanté .....	114
8.2 Variations d'énergie, puissance et force .....	117
8.3 Principe de réluctance minimale .....	119
8.4 Méthode des travaux virtuels .....	120
8.5 Dimensionnement des circuits magnétiques – produit $A_e \cdot S_b$ .....	124
Exercices .....	130
<b>CHAPITRE 9 • TRANSFORMATEURS .....</b>	<b>134</b>
9.1 Transformateur monophasé idéal .....	134
9.2 Mieux comprendre le transformateur .....	137
9.3 Le transformateur monophasé réel et son modèle .....	138
9.4 Grandeurs associées au schéma et chute de tension au secondaire .....	140
9.5 Notions complémentaires associées au transformateur réel .....	142
9.6 Transformateurs triphasés .....	145
9.7 Impédances associées aux transformateurs et ordres de grandeur .....	148
9.8 Transformateurs en parallèle .....	152
9.9 Autotransformateurs .....	154
Exercices .....	155
<b>CHAPITRE 10 • MATÉRIAUX ISOLANTS ET CONDENSATEURS .....</b>	<b>159</b>
10.1 Introduction .....	159
10.2 Matériaux isolants .....	159
10.3 Approche physique du condensateur .....	161
10.4 Formules courant/tension et énergies .....	163
10.5 Schéma équivalent et comportement en fréquence .....	164
10.6 Technologies de construction des condensateurs .....	165

10.7	Applications classiques du domaine de l'énergie .....	167
10.8	Supercondensateurs .....	171
<b>CHAPITRE 11 • CONVERTISSEURS ÉLECTROMÉCANIQUES .....</b>		<b>174</b>
11.1	Champ d'application et classification .....	174
11.2	Principes généraux .....	175
11.3	Les grandes familles de machines électriques .....	177
11.4	Machines à courant continu (MCC), machines « à collecteur » ....	177
11.5	Machines synchrones (MS) .....	180
11.6	Machines asynchrones (MAS) ou « Machines à induction » .....	185
11.7	Moteurs « pas à pas » .....	187
11.8	Nombres de « pôles » des machines électriques .....	190
11.9	Illustrations .....	193
<b>CHAPITRE 12 • MACHINES À COURANT CONTINU .....</b>		<b>196</b>
12.1	Principes et relations générales .....	196
12.2	Fonctionnement en régime permanent continu linéaire .....	200
12.3	Non-linéarités dues à la saturation du circuit magnétique .....	202
12.4	Fonctionnement en régime transitoire .....	204
12.5	Les différents montages des machines à courant continu .....	208
	Exercices .....	211
<b>CHAPITRE 13 • ALTERNATEURS ET MACHINES SYNCHRONES .....</b>		<b>213</b>
13.1	Principes et relations générales .....	213
13.2	Alternateur indépendant débitant sur charge linéaire .....	220
13.3	Machine synchrone couplée à un réseau d'énergie infinie .....	222
13.4	Réaction d'induit d'une machine synchrone .....	224
13.5	Étude des machines à pôles lisses : diagramme de Potier .....	226
13.6	Étude des machines à pôles saillants : diagramme de Blondel .....	228
13.7	Impédances associées réduites, ordres de grandeur .....	230

13.8	Moteur synchrone.....	232
	Exercices .....	235
<b>CHAPITRE 14 • MACHINES ASYNCHRONES .....</b>		<b>238</b>
14.1	Principes et relations générales.....	238
14.2	Fonctionnement à tension et fréquence constantes .....	244
14.3	Démarrage des moteurs asynchrones .....	248
14.4	Variation de vitesse des moteurs asynchrones.....	249
14.5	Fonctionnement en génératrice et en frein .....	255
14.6	Moteurs asynchrones monophasés .....	256
	Exercices .....	257
<b>CHAPITRE 15 • TRANSFORMATIONS MATRICIELLES. MODÈLES « D, Q » DES MACHINES À COURANTS ALTERNATIFS TRIPHASÉS .....</b>		<b>261</b>
15.1	Matrices d'impédances et d'inductances .....	261
15.2	Transformations matricielles classiques .....	262
15.3	La transformée de Park et le repère du champ tournant.....	264
15.4	Modèle « d,q » des machines synchrones .....	267
15.5	Modèle « d,q » des machines asynchrones .....	272
15.6	Conclusion sur les modèles <i>d,q</i> .....	276
	Exercices .....	
<b>CHAPITRE 16 • HARMONIQUES ET RÉGIMES DÉFORMÉS .....</b>		<b>278</b>
16.1	Bases mathématiques de l'étude des harmoniques.....	279
16.2	Expressions des puissances en régime déformé .....	285
16.3	Sources, propagation et conséquences des harmoniques.....	288
16.4	Harmoniques pairs et impairs, courant de neutre .....	289
16.5	Réduction et compensation des harmoniques .....	292
	Exercices .....	292

<b>CHAPITRE 17 • LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES</b> .....	296
17.1 Introduction .....	296
17.2 Structure générale des réseaux électriques .....	296
17.3 Production de l'énergie électrique .....	297
17.4 Caractéristiques générales du transport et de la distribution .....	299
17.5 Principes fondateurs des réseaux électriques .....	302
17.6 Phénomènes liés au fonctionnement des réseaux électriques en AC	306
17.7 Stratégie de fonctionnement des réseaux .....	311
17.8 Outils de modélisation et d'étude des réseaux électriques .....	316
17.9 Exemples de calculs liés aux modélisations .....	321
17.10 Réseaux en haute tension continue – HVDC .....	325
<b>CHAPITRE 18 • ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE ET BATTERIES</b> .....	334
18.1 Introduction .....	334
18.2 Modules solaires photovoltaïques .....	334
18.3 Installations photovoltaïques et raccordement au réseau .....	339
18.4 Conclusion portant sur l'énergie photovoltaïque .....	344
18.5 Batteries d'accumulateur et stockage d'énergie électrique .....	345
Exercices .....	350
<b>CONCLUSION</b> .....	355
<b>BIBLIOGRAPHIE ET LIENS</b> .....	357
<b>INDEX</b> .....	359