

# Sommaire

## PREMIÈRE PARTIE : ÉLECTRONIQUE DES SIGNAUX ET SYSTÈMES

### CHAPITRE I : NOTIONS SUR LES SIGNAUX ET LES SYSTÈMES

<b>1. Le signal en physique.....</b>	<b>3</b>
1.1. Notion de signal.....	3
1.2. Traitements des signaux.....	4
1.3. Signaux analogiques et signaux numériques.....	4
<b>2. Les systèmes.....</b>	<b>5</b>
2.1. Définition fonctionnelle par entrées et sorties de signaux.....	5
2.2. Entrées à fonctions particulières.....	6
2.3. Opérateur de transfert d'un système.....	6
2.4. Représentation par diagrammes fonctionnels (schémas-blocs).....	7
2.5. Encapsulation des systèmes.....	7
<b>3. Modélisation des systèmes.....</b>	<b>8</b>
3.1. Exemple introductif : quel modèle de voiture ?.....	8
3.2. Modèle de connaissance et modèle de comportement.....	9
<b>Exercices.....</b>	<b>10</b>

### CHAPITRE II : SYSTÈMES LINÉAIRES PERMANENTS

<b>1. Définitions et notions générales.....</b>	<b>13</b>
1.1. Invariance et permanence.....	13
1.2. Linéarité.....	14
1.3. Notions de stabilité, de continuité et de mémorisation.....	14
1.4. Modèle du signal éternel.....	15
1.5. Causalité temporelle, régime établi et régime transitoire.....	16
<b>2. Réponses particulières et signaux isomorphes.....</b>	<b>16</b>
2.1. Réponses à des signaux particuliers.....	16
2.2. Signaux isomorphes.....	17
<b>3. Opérateur de transfert d'un système linéaire permanent.....</b>	<b>18</b>
<b>4. Caractérisation expérimentale des systèmes linéaires permanents.....</b>	<b>18</b>
4.1. Caractérisations directes des propriétés de définition.....	18
4.2. Critère fondamental : réponse sinusoïdale à un signal sinusoïdal.....	19
4.3. Vérification du critère fondamental des signaux sinusoïdaux.....	19
<b>5. Mise en évidence des non-linéarités.....</b>	<b>20</b>
5.1. Étude du signal fonction du temps.....	20
5.2. Analyse spectrale d'un signal.....	20
<b>Exercices.....</b>	<b>21</b>

## CHAPITRE III : SIGNAUX ET TRANSMITTANCES COMPLEXES

<b>1. Signal complexe : définition et représentation géométrique</b> .....	<b>25</b>
1.1. Signal complexe associé à un signal réel isomorphe.....	25
1.2. Signaux complexes harmoniques représentant les signaux sinusoïdaux.....	26
1.3. Représentation géométrique de Fresnel des signaux de même $s$ .....	26
<b>2. Opérations sur les signaux complexes</b> .....	<b>27</b>
2.1. Opérations linéaires.....	27
2.2. Opérations non-linéaires : puissance et produit.....	28
2.3. Importance pratique des calculs sur les signaux complexes.....	29
<b>3. Transmittance d'un système linéaire permanent</b> .....	<b>29</b>
3.1. Transmittance complexe $H(s)$ .....	29
3.2. Transmittance harmonique $H(j\omega)$ .....	30
3.3. Utilisation opérationnelle des transmittances en fraction rationnelle .....	30
<b>4. Caractérisation harmonique de l'opérateur de transfert</b> .....	<b>31</b>
Exercices.....	32

## CHAPITRE IV : TRANSMITTANCES DES SYSTÈMES PHYSIQUES

<b>1. Signaux d'accès, transmittances et immittances</b> .....	<b>37</b>
1.1. Voies et grandeurs d'accès.....	37
1.2. Transmittances d'un système électrique linéaire à deux accès.....	38
1.3. Immittances d'un système électrique linéaire à un seul accès.....	38
<b>2. Causalité énergétique : grandeurs d'état et processeurs</b> .....	<b>39</b>
2.1. Exemples introductifs.....	39
2.2. Continuité énergétique, grandeurs d'état et causalité.....	40
2.3. Processeurs dipôles élémentaires.....	41
<b>3. Processeurs électriques linéaires élémentaires</b> .....	<b>42</b>
3.1. Les trois processeurs dipôles linéaires élémentaires.....	42
3.2. Processeurs quadripôles instantanés : modulateur et gyrateur.....	42
3.3. Processeurs quadripôles à retard .....	43
<b>4. Exemples de processeurs mécaniques élémentaires</b> .....	<b>44</b>
4.1. Éléments en translation .....	44
4.2. Éléments en rotation.....	44
4.3. Modulateur mécanique et gyrateur électromécanique .....	45
4.4. Méthode analogique d'étude.....	45
<b>5. Assemblages de composants élémentaires</b> .....	<b>46</b>
5.1. Systèmes à paramètres localisés.....	46
5.2. Opérateurs de connexions électriques.....	47
5.3. Représentations des assemblages électriques .....	47
5.4. Exemples d'assemblages électriques usuels .....	49
<b>6. Transmittances des systèmes linéaires à paramètres localisés</b> .....	<b>50</b>
6.1. Résultats généraux sur la forme des transmittances.....	50
6.2. Complément 1 : ordre du système et variables d'état.....	50
6.3. Complément 2 : expression générale des transmittances.....	51
6.4. Décomposition de la transmittance : transmittance instantanée et transmittance de mémorisation.....	51
Exercices.....	52
	53

## CHAPITRE V : ÉTUDE HARMONIQUE DES TRANSMITTANCES FONDAMENTALES

<b>1. Facteurs et transmittances élémentaires</b> .....	<b>57</b>
1.1. Décomposition d'une transmittance en facteurs .....	57
1.2. Transmittances élémentaires et transmittances fondamentales .....	59
1.3. Étude harmonique des transmittances .....	60
<b>2. Représentations graphiques des transmittances harmoniques</b> .....	<b>60</b>
2.1. Représentation en gain et phase .....	60
2.2. Diagramme de Bode .....	61
2.3. Diagrammes en partie réelle et partie imaginaire .....	63
<b>3. Filtres du premier ordre</b> .....	<b>63</b>
3.1. Filtre passe-bas du premier ordre .....	64
3.2. Filtre passe-haut du premier ordre .....	65
3.3. Passe-tout déphaseur du premier ordre .....	66
<b>4. Filtres du deuxième ordre</b> .....	<b>67</b>
4.1. Filtre passe-bande du deuxième ordre .....	67
4.2. Filtre passe-bas du deuxième ordre .....	71
4.3. Filtre passe-haut du deuxième ordre .....	72
4.4. Filtre coupe-bande .....	73
4.5. Passe-tout déphaseur du deuxième ordre .....	74
<b>Exercices</b> .....	<b>75</b>

## CHAPITRE VI : INTERCONNEXION ET RÉTROACTION DES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES

<b>1. Modèle de Thévenin-Norton d'un accès linéaire</b> .....	<b>79</b>
1.1. Immittances et électromoteurs .....	79
1.2. Sources de tension et sources de courant .....	80
1.3. Schémas de Thévenin et de Norton .....	81
1.4. Identification des paramètres d'un accès .....	82
<b>2. Modélisation des systèmes pour l'interconnexion</b> .....	<b>83</b>
2.1. Transmittances des sources commandées .....	83
2.2. Modélisation d'un quadripôle .....	84
2.3. Connexion de deux accès : connexion idéale et connexion adaptée .....	84
2.4. Accès et système unidirectionnels .....	86
<b>3. Interconnexion en chaîne</b> .....	<b>87</b>
3.1. Connexion des accès et conducteur de masse .....	87
3.2. Transmittance et bande passante .....	87
<b>4. Interconnexion en boucle : rétroaction</b> .....	<b>88</b>
4.1. Diagramme fonctionnel, transmittance et bande passante .....	88
4.2. Connexions des accès et immittances .....	89
4.3. Intérêts de la rétroaction .....	89
<b>Exercices</b> .....	<b>91</b>

## CHAPITRE VII : AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL : MODÈLES ET MONTAGES

<b>1. Modèle de l'amplificateur opérationnel parfait</b> .....	<b>97</b>
1.1. L'amplificateur différentiel intégré à très grande transmittance .....	97
1.2. Rétroaction élémentaire : le montage suiveur .....	98
1.3. Le modèle parfait à nulleur.....	99

<b>2. Structures de base</b> .....	<b>100</b>
2.1. Premier montage : inversion de transmittance .....	100
2.2. Deuxième montage : conversion courant-tension .....	101
2.3. Troisième montage : opposeur de courant ou d'impédance .....	101
<b>3. Montages amplificateurs ou multiplicateurs par une constante</b> .....	<b>102</b>
3.1. Opérateur d'amplification .....	102
3.2. Amplificateur de tension positif ou non-inverseur .....	102
3.3. Amplificateur de tension négatif ou inverseur .....	103
<b>4. Limites du domaine linéaire : saturations</b> .....	<b>103</b>
4.1. Saturation en tension .....	104
4.2. Saturation en courant .....	104
4.3. Saturation en pente .....	105
<b>5. Transmittance d'un amplificateur opérationnel</b> .....	<b>106</b>
5.1. Influence de la fréquence sur un montage amplificateur .....	106
5.2. Influence de la fréquence sur l'amplificateur opérationnel .....	107
5.3. Produit gain-bande passante .....	108
<b>6. Montages dérivateurs et intégrateurs</b> .....	<b>109</b>
6.1. Montages dérivateurs .....	109
6.2. Montages intégrateurs .....	110
<b>7. Montages à plusieurs entrées</b> .....	<b>111</b>
7.1. Sommateur .....	111
7.2. Soustracteur et amplificateur différentiel .....	112
7.3. Réjection de mode commun de l'amplificateur opérationnel .....	112
<b>8. Modèle linéaire de l'amplificateur opérationnel</b> .....	<b>113</b>
Exercices .....	114

## CHAPITRE VIII : RÉPONSES LIBRES ET MODES PROPRES D'UN SYSTÈME

<b>1. Origine et structure des réponses libres</b> .....	<b>125</b>
1.1. Notion de réponse libre et origine physique .....	125
1.2. Espace des états et trajectoires d'état .....	126
1.3. Structure en modes propres des réponses libres .....	126
<b>2. Étude expérimentale des réponses libres</b> .....	<b>127</b>
2.1. Excitation par des échelons .....	127
2.2. Visualisation sur oscilloscope .....	128
<b>3. Exemple 1 : réponses libres d'un système d'ordre 1</b> .....	<b>129</b>
3.1. Étude expérimentale des systèmes à circuit RC .....	129
3.2. Étude théorique .....	129
<b>4. Exemple 2 : réponses libres d'un système d'ordre 2</b> .....	<b>130</b>
4.1. Étude expérimentale d'un circuit RLC .....	130
4.2. Étude théorique des types de modes propres et de réponses libres .....	132
4.3. Influence du facteur de qualité sur la constante de temps des modes .....	134
4.4. Réponses libres du circuit RLC passe-bas .....	135
<b>5. Réponses libres des systèmes linéaires stables</b> .....	<b>136</b>
5.1. Réponse à un saut de signal .....	136
5.2. Réponses libres des systèmes d'ordre 1 ou 2 .....	137
5.3. Réponses libres des systèmes d'ordre supérieur à 2 .....	138
5.4. Dominance de mode, temps caractéristique et rapidité .....	139
<b>6. Réponses libres des montages à amplificateur opérationnel</b> .....	<b>140</b>
6.1. Réponse d'un amplificateur opérationnel à un échelon .....	140
6.2. Exercice d'application : réponse libre d'un amplificateur positif .....	141

- 7. Caractérisation d'un système par ses réponses libres.....142**
- 7.1. Méthodes générales ..... 142
- 7.2. Méthodes particulières à certains modes ..... 142
- 7.3. Exercice d'application : identification d'un mode oscillatoire ..... 143
- Exercices .....145**

**CHAPITRE IX : RÉPONSES AUX SIGNAUX CANONIQUES DE CARACTÉRISATION**

- 1. Définitions et modélisations des signaux canoniques .....157**
- 1.1. Modèle d'un échelon : échelon unité d'Heaviside ..... 157
- 1.2. Modèle d'une rampe ..... 158
- 1.3. Modélisation des signaux impulsions ..... 158
- 2. Réponses indicielles des systèmes linéaires .....160**
- 2.1. Définition et propriétés générales..... 160
- 2.2. Réponses indicielles des transmittances d'ordre 1 ..... 161
- 2.3. Réponses indicielles des transmittances modales d'ordre 2..... 161
- 3. Réponses à une rampe et réponses impulsionnelles .....163**
- 3.1. Réponses à la rampe unité ..... 163
- 3.2. Réponses impulsionnelles ..... 164
- 4. Complément : relations entre réponse impulsionnelle et transmittance.....165**
- 4.1. Expression de la transmittance comme transformée de Laplace ..... 165
- 4.2. Transmittance harmonique et transformée de Fourier ..... 166
- 4.3. Application à la caractérisation impulsionnelle d'un système ..... 166
- Exercices .....168**

**CHAPITRE X : FILTRAGE DE FRÉQUENCES ET ANALYSE SPECTRALE**

- 1. Filtrage dans l'espace des fréquences.....171**
- 1.1. Notion de filtrage ..... 171
- 1.2. Représentation d'un signal en fonction de la fréquence : spectre ..... 172
- 1.3. Espace des fréquences ..... 173
- 1.4. Filtres de fréquence ..... 173
- 2. Exemples de structures de filtres analogiques .....174**
- 2.1. Composants élémentaires et filtres passifs ..... 174
- 2.2. Filtres à connexions idéales..... 174
- 2.3. Filtres actifs ..... 175
- 2.4. Filtres programmables ou universels..... 176
- 3. Propriétés d'un filtre de fréquences .....176**
- 3.1. Effet sur l'amplitude : bande passante et zones spectrales ..... 176
- 3.2. Effets sur la phase : temps de retard de phase et déphasage minimal ..... 177
- 3.3. Effets sur une modulation : temps de retard de groupe ..... 178
- 3.4. Distorsions linéaires d'un signal ..... 179
- 4. Analyse spectrale par filtrage sélectif.....180**
- 4.1. Caractéristiques d'analyse d'un filtre sélectif ..... 180
- 4.2. Éléments d'un analyseur de spectre et notions de spectrométrie ..... 180
- 5. Représentations temporelles et représentations fréquentielles .....181**
- 5.1. Les deux représentations d'un système et d'un signal..... 181
- 5.2. Complément 1 : représentation temporelle du filtrage ..... 182
- 5.3. Complément 2 : de l'analyse par filtrage sélectif à l'analyse de Fourier ..... 183
- Exercices .....184**

## CHAPITRE XI : INITIATION À L'ANALYSE SPECTRALE NUMÉRIQUE

<b>1. Acquisition du signal</b> .....	193
<b>2. Notions sur les transformées de Fourier</b> .....	194
2.1. Transformée de Fourier : définition et interprétations physiques.....	194
2.2. Transformée inverse de Fourier : définition et interprétation physique .....	196
2.3. Exemples de transformées de Fourier .....	196
<b>3. Séries de Fourier et dualité périodisation-échantillonnage</b> .....	197
3.1. Spectre d'un signal périodique : série de Fourier.....	197
3.2. Expressions par un peigne de l'échantillonnage et de la périodisation .....	198
3.3. Dualité périodisation-échantillonnage.....	199
3.4. Exemples d'application : signaux en rectangles et en triangles .....	200
<b>4. Analyse de Fourier numérique</b> .....	201
4.1. Calcul numérique de la transformée de Fourier.....	201
4.2. Influence du fenêtrage et de l'échantillonnage.....	201
4.3. Affichage du spectre .....	202
<b>5. Études d'effets de numérisation sur des spectres</b> .....	203
5.1. Résolution du spectre d'un signal en rectangles.....	203
5.2. Séparation des raies d'un signal sinusoïdal modulé .....	204
5.3. Recouvrement (ou repliement) de spectres.....	205
5.4. Étalement des raies par effet de troncature.....	205
<b>Exercices</b> .....	206

## CHAPITRE XII : EXEMPLES DE RÉPONSES TRANSITOIRES ET DE RÉPONSES FORCÉES

<b>1. Transition entre signaux</b> .....	207
1.1. Partition temporelle du signal d'entrée .....	207
1.2. Réponse transitoire et réponse forcée .....	208
<b>2. Premier exemple : établissement d'un signal sinusoïdal</b> .....	209
<b>3. Deuxième exemple : réponse à un signal en rectangles</b> .....	211
3.1. Étude par partitions multiples dans le cas où $t_M < T/2$ .....	211
3.2. Étude par partition unique : régime transitoire .....	212
3.3. Méthodes d'étude de la réponse forcée à un signal en rectangles.....	213
3.4. Réponses forcées d'un passe-bas d'ordre 1.....	214
3.5. Réponses forcées d'un passe-haut d'ordre 1 .....	216
<b>4. Troisième exemple : réponse à un signal en triangles</b> .....	218
4.1. Étude temporelle avec les partitions.....	218
4.2. Exemples d'études fréquentielles.....	219
<b>Exercices</b> .....	221

## CHAPITRE XIII : ÉTUDE ET UTILISATIONS D'UN MULTIPLIEUR

<b>1. Présentation du multiplieur</b> .....	223
1.1. Opérateur multiplieur .....	223
1.2. Exemple du composant AD633.....	224
1.3. Limites du domaine de fonctionnement du multiplieur .....	225
<b>2. Exemples d'utilisations du multiplieur</b> .....	225
2.1. Opérateur multiplicateur commandé et asservissement d'amplitude .....	225
2.2. Opérateur quadrateur et mesure de valeur efficace .....	226
2.3. Mesures de puissances électriques et de facteurs de puissance.....	227
2.4. Mesure d'impédance.....	227
2.5. Mesure d'une amplitude spectrale.....	227

<b>3.</b>	<b>Application à la modulation d'amplitude .....</b>	<b>228</b>
3.1.	Notion de modulation d'amplitude .....	228
3.2.	Étude spectrale d'une modulation sinusoïdale .....	228
3.3.	Application à une modulation en rectangles .....	229
<b>4.</b>	<b>Transposition et convolution de fréquences .....</b>	<b>230</b>
<b>5.</b>	<b>Application à la transmission des signaux .....</b>	<b>232</b>
5.1.	Utilisation optimale de l'espace des fréquences .....	232
5.2.	Démodulation synchrone d'un signal modulé en amplitude .....	233
	<b>Exercices .....</b>	<b>234</b>

## CHAPITRE XIV : OSCILLATEURS QUASI SINUSOÏDAUX

<b>1.</b>	<b>Exemple introductif : circuit RLC à résistance négative .....</b>	<b>239</b>
1.1.	Montage et étude expérimentale .....	239
1.2.	Résultats généraux de l'étude .....	242
<b>2.</b>	<b>Conditions de génération d'oscillations sinusoïdales .....</b>	<b>243</b>
2.1.	Conditions générales de stabilité et d'instabilité d'un système .....	243
2.2.	Condition d'oscillation sur la transmittance .....	243
2.3.	Condition sur le produit de boucle .....	244
2.4.	Exercice d'application 1 : filtre SK passe-bas .....	245
<b>3.</b>	<b>Condition d'oscillation sur le produit de boucle harmonique .....</b>	<b>246</b>
3.1.	Utilisation des transmittances harmoniques .....	246
3.2.	Critère de Barkhausen .....	246
3.3.	Critère pratique d'instabilité et marges de stabilité .....	247
3.4.	Exercice d'application 2 : oscillateur à filtre LC .....	248
<b>4.</b>	<b>Oscillateurs à opérateurs spécialisés .....</b>	<b>249</b>
4.1.	Structure .....	249
4.2.	Exercice d'application 3 : oscillateurs à réseau déphaseur .....	249
4.3.	Oscillateurs à filtre passif à résonance .....	251
4.4.	Exercice d'application 4 : oscillateurs à passe-bande d'ordre 2 .....	252
4.5.	Exemples de filtres à résonance pour oscillateurs .....	253
<b>5.</b>	<b>Stabilisation et commande de l'amplitude d'un oscillateur sinusoïdal .....</b>	<b>254</b>
	<b>Exercices .....</b>	<b>256</b>

## CHAPITRE XV : COMPARETEURS ET OSCILLATEURS DE RELAXATION

<b>1.</b>	<b>Compareteur simple de tensions .....</b>	<b>259</b>
1.1.	Montage et fonctionnement statique .....	259
1.2.	Fonctionnement dynamique .....	260
<b>2.</b>	<b>Notions sur les signaux et les traitements logiques et numériques .....</b>	<b>261</b>
2.1.	Les signaux logiques .....	261
2.2.	Composants et circuits logiques .....	261
2.3.	Électronique numérique et informatique .....	262
<b>3.</b>	<b>Opérateurs compareteurs .....</b>	<b>263</b>
3.1.	Compareteur de deux signaux .....	263
3.2.	Compareteurs dérivés .....	264
<b>4.</b>	<b>Compareteurs à hystérésis .....</b>	<b>265</b>
4.1.	Utilité d'un compareteur à deux seuils .....	265
4.2.	Montage de base : compareteur à hystérésis inverseur symétrique .....	265
4.3.	Autres compareteurs à hystérésis .....	266
<b>5.</b>	<b>Introduction à la fonction de mémorisation .....</b>	<b>267</b>

<b>6. Oscillateur de relaxation ou multivibrateur</b> .....	269
6.1. Éléments d'un oscillateur de relaxation .....	269
6.2. Montage à résistor et condensateur .....	269
6.3. Montages à intégrateur-inverseur .....	270
6.4. Réglage des signaux d'un multivibrateur .....	272
6.5. Convertisseur tension-fréquence ou oscillateur commandé en tension .....	273
6.6. Quelques applications des multivibrateurs commandés .....	273
<b>Exercices</b> .....	275

## DEUXIÈME PARTIE : CONVERSION DE PUISSANCE

### CHAPITRE XVI : INTRODUCTION À LA CONVERSION DE PUISSANCE

<b>1. Domaine de la conversion de puissance</b> .....	281
1.1. Traitement de signal et traitement de puissance .....	281
1.2. Conversion d'énergie et conversion de puissance .....	283
<b>2. Notions associées aux puissances</b> .....	284
2.1. Diagramme fonctionnel de la conversion de la puissance .....	284
2.2. Rendement .....	284
2.3. Expressions des puissances .....	285
2.4. Présentation de la puissance électrique .....	285
<b>3. Panorama des convertisseurs de puissance</b> .....	286
<b>Exercices</b> .....	288

### CHAPITRE XVII : AIMANTATION DES FERROMAGNÉTIQUES ET CIRCUITS MAGNÉTIQUES

<b>1. Rappels d'électromagnétisme</b> .....	289
1.1. Champs macroscopiques dans un milieu magnétique .....	289
1.2. Grandeurs intégrales définies sur les champs : flux et circulation .....	291
1.3. Équations locales et propriétés intégrales du champ électromagnétique .....	292
1.4. Relation d'aimantation .....	292
1.5. Énergie magnétique .....	292
<b>2. Étude expérimentale de la relation d'aimantation d'un ferromagnétique : cycle d'hystérésis</b> .....	293
2.1. Dispositif expérimental .....	293
2.2. Fonctionnement .....	294
2.3. Visualisation et étude du cycle d'hystérésis .....	295
2.4. Ordres de grandeurs .....	296
<b>3. Modèles simplifiés de la relation d'aimantation</b> .....	296
3.1. Modèle à saturations pour la fonction mémoire .....	296
3.2. Modèle linéaire sans pertes .....	296
3.3. Modèle linéaire avec pertes .....	296
<b>4. Structure et caractéristiques des circuits ferromagnétiques</b> .....	297
4.1. Constitution .....	297
4.2. Application des lois de l'électromagnétisme .....	298
4.3. Modèle électrocinétique d'un circuit magnétique .....	299
<b>5. Propriétés fondamentales des circuits ferromagnétiques</b> .....	300
5.1. Guidage du flux magnétique .....	300
5.2. Obtention de champs intenses et influence des entrefers .....	301
<b>Exercices</b> .....	302

## CHAPITRE XVIII : TRANSFORMATEUR ET CONVERSION ÉLECTROMAGNÉTIQUE STATIQUE

<b>1. Éléments d'un transformateur .....</b>	<b>305</b>
1.1. Couplage par circuit magnétique et transfert de puissance .....	305
1.2. Grandeurs, symbole, rapport de transformation .....	306
1.3. Réserve d'énergie, grandeurs d'état, pertes et bilan des puissances .....	308
<b>2. Modèle parfait du transformateur .....</b>	<b>309</b>
2.1. Définition et approximations .....	309
2.2. Équations du transformateur parfait .....	310
2.3. Représentations du transformateur parfait .....	310
2.4. Transferts de paramètres entre secondaire et primaire .....	311
<b>3. Modèle du transformateur avec magnétisation .....</b>	<b>312</b>
3.1. Prise en compte de la magnétisation du circuit magnétique .....	312
3.2. Équations du transformateur avec magnétisation .....	312
3.3. Représentations graphiques du modèle .....	313
3.4. Mise en évidence de la non-linéarité de la magnétisation .....	313
<b>4. Modèle linéaire du transformateur .....</b>	<b>314</b>
4.1. Équations du modèle sans pertes à couplage parfait .....	314
4.2. Représentations du modèle linéaire sans perte .....	315
4.3. Termes correctifs des pertes et des fuites .....	316
<b>5. Conversion électromagnétique statique .....</b>	<b>317</b>
5.1. Conditions de fonctionnement .....	317
5.2. Étude du rendement .....	317
5.3. Application au transport de l'énergie sous forme électrique .....	318
<b>6. Autres utilisations des transformateurs .....</b>	<b>319</b>
6.1. Transformateur d'adaptation d'impédance .....	319
6.2. Transformateur d'isolement .....	320
6.3. Transformateurs de mesure .....	321
6.4. Influence de la fréquence en transmission de signal par un transformateur .....	322
<b>Exercices .....</b>	<b>323</b>

## CHAPITRE XIX : CONVERSION ÉLECTROMÉCANIQUE ET MOTEUR À COURANT CONTINU

<b>1. Couplage électromécanique à circuit mobile .....</b>	<b>327</b>
1.1. Force de Laplace et force unitaire électromotrice .....	327
1.2. Conservation de la puissance dans le couplage .....	328
1.3. Expressions des puissances converties .....	329
<b>2. Bilan des puissances dans un système électromécanique, fonctionnement en moteur ou en générateur .....</b>	<b>330</b>
2.1. Généralisation de la loi de conservation de la puissance convertie .....	330
2.2. Réversibilité de la conversion, mode moteur et mode générateur .....	331
2.3. Bilan des puissances et rendement .....	331
<b>3. Architectures de machines tournantes .....</b>	<b>332</b>
3.1. Éléments de la machine .....	332
3.2. Dispositions géométriques .....	333
3.3. Architecture à inducteur au stator et champ longitudinal : la roue de Barlow .....	333
3.4. Architecture à inducteur au rotor et champ transversal : l'aimant tournant .....	334
3.5. Architecture à inducteur au stator et champ transversal : le cadre tournant .....	335
3.6. Exemple de machine à aimants permanents et collecteur .....	336
<b>4. Modélisation de la machine à courant continu .....</b>	<b>337</b>
4.1. Grandeurs de couplage et processeur gyrateur .....	337

- 4.2. Paramètres, équations et représentations du modèle..... 339
- 5. Fonctionnement en régime permanent..... 341**
  - 5.1. Équations et représentations du régime permanent ..... 341
  - 5.2. Interprétation physique du fonctionnement en moteur ..... 342
  - 5.3. Fonctionnement en génératrice..... 343
  - 5.4. Pertes et rendement ..... 343
- 6. Fonctionnement en régime variable ..... 345**
  - 6.1. Représentations du modèle ..... 345
  - 6.2. Exercice d'application : temps caractéristiques et modes propres ..... 346
  - 6.3. Propriétés de continuité de la vitesse et de l'intensité..... 347
  - 6.4. Exercice d'application : effet d'un saut de tension sur un moteur..... 348
- 7. Utilisation des moteurs à courant continu et perspectives de la conversion électromécanique ..... 349**
  - 7.1. Quelques exemples ..... 349
  - 7.2. Perspectives d'évolution ..... 349
- Exercices..... 350**

**CHAPITRE XX : CHAMPS TOURNANTS ET MOTEUR SYNCHRONE**

- 1. Introduction au modèle vectoriel ..... 353**
  - 1.1. Modèle vectoriel de l'interaction entre stator et rotor dans une machine à courant continu ... 353
  - 1.2. Architectures vectorielles ..... 355
- 2. Champs tournants et système diphasé ..... 356**
  - 2.1. Champ tournant statorique..... 356
  - 2.2. Définitions des systèmes diphasés et des pulsations algébriques ..... 357
  - 2.3. Champs tournants rotoriques..... 358
  - 2.4. Relations entre pulsation et vitesse angulaire ..... 359
  - 2.5. Expressions généralisées des vitesses des champs tournants..... 360
- 3. Représentations complexes harmoniques des grandeurs diphasées et des champs tournants ..... 361**
  - 3.1. Expression complexe d'une grandeur diphasée ..... 361
  - 3.2. Expressions complexes d'un champ tournant et d'un champ pulsant ..... 361
  - 3.3. Opérations et diagramme vectoriel avec des grandeurs complexes ..... 361
  - 3.4. Exercice d'application : relations entre champ pulsant et champ tournant..... 362
- 4. Couplage électromécanique synchrone..... 363**
  - 4.1. Formation du couple électromagnétique, condition de synchronisme ..... 363
  - 4.2. Représentations complexes et vectorielles des grandeurs électromagnétiques..... 365
  - 4.3. Puissance convertie et constante de couplage..... 367
- 5. Modélisation de la machine synchrone ..... 368**
  - 5.1. Paramètres du modèle..... 368
  - 5.2. Équations, schéma électromécanique et diagramme synchrone ..... 369
- 6. Fonctionnement d'un moteur synchrone à tension imposée ..... 371**
  - 6.1. Grandeurs d'accès..... 371
  - 6.2. Démarrage et fonctionnement à vide ..... 371
  - 6.3. Fonctionnement en charge : maximum et décrochage ..... 372
  - 6.4. Exercice d'application : étude des réponses d'un moteur ..... 373
- 7. Généralisation du modèle vectoriel et typologie des machines tournantes. 374**
  - 7.1. Machine synchrone à vitesse variable..... 374
  - 7.2. Typologie des machines tournantes..... 375
  - 7.3. Principe du moteur asynchrone à induction..... 376
  - 7.4. Exercice d'application : couple d'un moteur asynchrone..... 376
- Exercices..... 378**

## CHAPITRE XXI : CONVERSION ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

<b>1. Introduction à la conversion électronique .....</b>	<b>381</b>
1.1. Premier exemple : chauffage et éclairage .....	381
1.2. Deuxième exemple : alimentation de secours .....	382
1.3. Présentation continue et présentation alternative de la puissance .....	383
1.4. Conversion statique électronique .....	384
<b>2. Natures et réversibilités des sources à connecter .....</b>	<b>385</b>
2.1. Notions de sources instantanées de tension et de courant .....	385
2.2. Amélioration et transformation de la nature d'une source .....	386
2.3. Réversibilités et symboles des sources .....	387
<b>3. Règles et structures de connexion des sources .....</b>	<b>388</b>
3.1. Exemple introductif : charge d'un condensateur .....	388
3.2. Règles d'interconnexion des sources .....	389
3.3. Structure des convertisseurs directs entre deux sources .....	389
3.4. Convertisseurs indirects .....	391
<b>4. Commutation d'une cellule élémentaire tripôle .....</b>	<b>391</b>
4.1. Notions de commutation et de cellule élémentaire .....	391
4.2. Fonctionnement en commutation naturelle .....	392
<b>5. Les interrupteurs : composants et opérateurs .....</b>	<b>393</b>
5.1. Notions générales sur les interrupteurs .....	393
5.2. Opérateurs interrupteurs .....	395
5.3. Modèle primitif de l'interrupteur mécanique .....	396
5.4. Diode de puissance et opérateur D .....	396
5.5. Transistor de puissance et opérateur T .....	397
5.6. Autres composants et opérateurs .....	398
5.7. Performances et défauts des composants interrupteurs .....	399
<b>Exercices .....</b>	<b>399</b>

## CHAPITRE XXII : CONVERTISSEUR TENSION-COURANT NON RÉVERSIBLE

<b>1. Synthèse du convertisseur tension-courant non réversible .....</b>	<b>403</b>
1.1. Conditions imposées .....	403
1.2. Configurations et structure .....	404
1.3. Choix des interrupteurs et constitution du convertisseur .....	405
<b>2. Modélisation du convertisseur-hacheur .....</b>	<b>406</b>
2.1. Modélisation des configurations : fonction de conversion .....	406
2.2. Représentation fonctionnelle .....	407
<b>3. Fonctionnement du hacheur à fréquence élevée .....</b>	<b>408</b>
3.1. Modélisation du circuit et de la commande .....	408
3.2. Décomposition du courant de réponse $i_s$ .....	409
3.3. Modèle de comportement moyen du hacheur .....	410
3.4. Remarques générales sur le fonctionnement d'un hacheur .....	411
<b>4. Étude de l'ondulation du courant .....</b>	<b>411</b>
4.1. Équation et expressions générales de l'ondulation du courant .....	411
4.2. Évolution de l'amplitude d'ondulation en fonction des paramètres .....	412
4.3. Fonctionnement en mode de conduction discontinue .....	414
<b>Exercices .....</b>	<b>415</b>

**CHAPITRE XXIII : PROBLÈME DE SYNTHÈSE : COMMANDE PAR  
HACHEUR D'UN MOTEUR À COURANT CONTINU**

<b>1. Étude du fonctionnement d'un moteur à courant continu alimenté par un hacheur.....</b>	<b>420</b>
1.1. Énoncé .....	420
1.2. Solution .....	423
<b>2. Étude de la transmittance de commande en vitesse du moteur.....</b>	<b>426</b>
2.1. Énoncé .....	426
2.2. Solution .....	428
<b>3. Étude d'un asservissement de vitesse fonctionnant en régulation.....</b>	<b>430</b>
3.1. Énoncé .....	430
3.2. Solution .....	433
<b>Réponses aux exercices supplémentaires .....</b>	<b>437</b>
<b>INDEX .....</b>	<b>453</b>