ELECTRICITÉ GÉNÉRALE

4ème Année

Option Mécanique Générale



CONFORME AU PROGRAMME NATIONAL

EDITION 2025



TABLE DES MATIÈRES

PRÉLIMINAIRES **1**

Objectifs Pédagogiques du Cours 1

- 1. Maîtrise des concepts fondamentaux 1
- 2. Développement des compétences d'analyse de circuits 1
- 3. Acquisition des savoir-faire pratiques et sécuritaires 1

Approche Didactique et Méthodologique 1

- 1.1. Ancrage Pratique et Raisonnement Inductif 1
- 1.2. Priorisation de la Compétence Technique 2
- 1.3. Progression Spiralaire et Préparation à la Certification 2

Contexte Industriel et Sécurité 2

- 1.1. De la Théorie à la Pratique Industrielle 2
- 1.2. La Primauté de la Sécurité 2
- 1.3. L'Interconnexion des Métiers 3

PARTIE I : LES MACHINES TOURNANTES À COURANT ALTERNATIF **4**

a. Du courant au mouvement 4

b. Deux familles, un même principe 4

c. L'avantage du courant alternatif 4

d. L'impact sur l'industrie et le quotidien 4

CHAPITRE 1 : LE CHAMP TOURNANT ET LE MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ **5**

1.1. Création du Champ Magnétique Tournant 5

- a. Le principe de la rotation sans contact 5
- A. Les Systèmes de Courants Triphasés 5
- B. Création du Champ par les Bobinages du Stator 5

FIGURE 1 : RÉF. IMG (7833-3060-1382) **7**

Composition des trois champs magnétiques pour créer un champ résultant tournant 7

- C. Vitesse de Synchronisme () 7
- SCÉNARIOS ET EXERCICES 8

1.2. Le Moteur Synchrone : Principe et Propriétés 9

- a. Le cousin qui ne plaisante pas avec l'heure 9

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- A. Principe de fonctionnement : la synchronisation parfaite.....10

FIGURE 2 : RÉF. IMG (3218-4532-7094).....12

Interaction champ tournant stator et pôles fixes du rotor synchrone.....12

- B. Propriétés et applications distinctives.....12
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....13

1.3. Constitution des Moteurs Asynchrones (Cage et Rotor Bobiné).....15

- a. Une apparence, deux réalités.....15
- A. Le Stator : La Source du Champ Tournant.....15
- B. Le Rotor : Deux Technologies pour une Rotation.....15

FIGURE 3 : RÉF. IMG (2153-3665-4428).....18

Vue éclatée comparant un rotor à cage et un rotor bobiné.....18

- Anecdote : La sagesse de Papa Kanku au port de Boma.....18

CHAPITRE 2 : CARACTÉRISTIQUES ET FONCTIONNEMENT DU MOTEUR ASYNCHRONE....21

2.1. Le Phénomène de Glissement.....21

- a. Le retard qui produit la force.....21
- A. Vitesse de synchronisme ().....21
- B. Glissement ().....21

FIGURE 4 : RÉF. IMG (7000-1189-5532).....24

Schéma comparant la vitesse du champ tournant et la vitesse du rotor.....24

- C. Relation entre les vitesses.....24

2.2. Le Couple Moteur et sa Caractéristique.....26

- a. Le paradoxe de la force qui tourne.....26
- A. La Notion de Couple Moteur (C).....27
- B. La Caractéristique Couple-Vitesse C(n).....27

FIGURE 5 : RÉF. IMG (7544-1047-8182).....28

Caractéristique mécanique couple-vitesse d'un moteur asynchrone triphasé.....28

- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....28

2.3. Fonctionnement, Plaque Signalétique et Comparaison des Technologies.....30

- a. Le principe du décalage permanent.....30
- A. Le Glissement : Le Secret de l'Asynchronisme.....30
- B. La Plaque Signalétique : La Carte d'Identité du Moteur.....31

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

FIGURE 6 : RÉF. IMG (3801-7377-3422) **34**

Lecture d'une plaque signalétique de moteur asynchrone triphasé 34

- C. Comparaison des Technologies : Cage vs. Rotor Bobiné 34

CHAPITRE 3 : LES PROCÉDÉS DE DÉMARRAGE DES MOTEURS ASYNCHRONES **37**

3.1. Le Démarrage Direct (DOL) 37

- a. Introduction au démarrage direct 37
- A. Principe de Fonctionnement 37

FIGURE 7 : RÉF. IMG (9996-4545-3878) **39**

Schéma de puissance et de commande pour un démarrage direct simple 39

- B. Avantages et Inconvénients 39
- C. Domaines d'Application 40

FIGURE 8 : RÉF. IMG (7182-5608-0137) **42**

Courbes caractéristiques du courant et du couple au démarrage direct 42

- Scénarios et Exercices 42

3.2. Le Démarrage Étoile-Triangle 44

- a. L'erreur du grand frère 44
- A. Principe de fonctionnement 44
- B. Analyse des grandeurs électriques 45

FIGURE 9 : RÉF. IMG (4991-2443-1706) **46**

Schéma de puissance d'un démarreur étoile-triangle avec ses trois contacteurs 46

- SCÉNARIOS ET EXERCICES 46

3.3. Démarrages par Tension Réduite (Résistances, Autotransformateur, Rotor B 48

- a. Un démarrage en douceur pour préserver le matériel 48
- A. Démarrage par résistances statoriques 48
- B. Démarrage par autotransformateur 49
- C. Démarrage rotorique (Moteur à rotor bobiné) 49

CHAPITRE 4 : VARIATION DE VITESSE ET MOTEURS SPÉCIAUX **52**

4.1. Variation de Vitesse par Changement du Nombre de Pôles 52

- a. Le secret du cycliste de Mbandaka 52
- A. Relation Vitesse-Pôles : La Loi Fondamentale 52

FIGURE 10 : RÉF. IMG (5936-4437-9864) **53**

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Schéma comparatif des enroulements statoriques à 2 et 4 pôles.....53
- B. Moteurs à Enroulements Séparés et Moteur Dahlander.....53
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....54

4.2. Introduction aux Variateurs de Vitesse Électroniques.....56
- a. Le contrôle ancestral et la révolution électronique.....56
- A. Le Principe Fondamental : Jouer avec la Fréquence.....56
- B. L'Architecture d'un Variateur de Vitesse.....57

4.3. Moteurs Spécifiques : Asynchrone Monophasé et Universel.....60
- a. L'étincelle du quotidien.....60
- A. Le moteur asynchrone monophasé : la force tranquille du quotidien.....60
- B. Le moteur universel : le passe-partout de l'électroportatif.....61

PARTIE II : LES TRANSFORMATEURS ET LE TRANSPORT DE L'ÉNERGIE.....64

a. Le défi de la distance.....64

b. L'ennemi scientifique : l'effet Joule.....64

c. La solution technologique : le transformateur.....64

d. L'organisation du réseau national.....64

CHAPITRE 5 : LE TRANSFORMATEUR MONOPHASÉ.....65

5.1. Constitution et Principe de Fonctionnement.....65
- a. L'indispensable inconnu.....65
- A. Constitution : un cœur et deux âmes.....65

FIGURE 11 : RÉF. IMG (4487-6165-0135).....67

Schéma de principe d'un transformateur monophasé avec ses composants essentiels.....67
- B. Principe de fonctionnement : la magie de l'induction.....67
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....68

5.2. Modèle Théorique, Rapport de Transformation et Bilan des Puissances.....69
- a. Le transformateur, un génie discret.....69
- A. Le Modèle du Transformateur Parfait.....70
- B. Le Rapport de Transformation (m).....70
- C. Le Bilan des Puissances.....71

5.3. L'Autotransformateur : Principe et Risques.....73
- a. L'art de l'économie.....73
- A. Principe de fonctionnement : une seule bobine pour deux rôles.....73

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

FIGURE 12 : RÉF. IMG (8925-2276-5284) **75**

Schéma de principe d'un autotransformateur abaisseur de tension 75

- B. Risques majeurs et applications 75

FIGURE 13 : RÉF. IMG (7302-2740-8105) **78**

Danger d'une rupture du bobinage commun sur l'autotransformateur 78

- SCÉNARIOS ET EXERCICES 79

CHAPITRE 6 : LE TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ ET SES APPLICATIONS **81**

6.1. Constitution et Couplage des Enroulements 81

- a. Le besoin d'une puissance stable 81
- A. Constitution d'un transformateur triphasé 81

FIGURE 14 : RÉF. IMG (7610-5311-9906) **83**

Schéma du circuit magnétique et des enroulements d'un transformateur triphasé 83

- B. Les couplages fondamentaux : Étoile et Triangle 83
- SCÉNARIOS ET EXERCICES 84

6.2. Indice Horaire et Groupe de Couplage 86

- a. L'horloge comme instrument de synchronisation 86
- A. Le Déphasage et l'Analogie de l'Horloge 86

FIGURE 15 : RÉF. IMG (6723-6181-2947) **89**

Représentation de l'indice horaire sur un cadran d'horloge analogique 89

- B. Symboles et Groupes de Couplage 89

FIGURE 16 : RÉF. IMG (7706-6269-6789) **92**

Schémas des couplages fondamentaux Étoile (Y) et Triangle (D) 92

- SCÉNARIOS ET EXERCICES 92

6.3. Technologie et Refroidissement 94

- a. Chaleur : ennemi silencieux et ami ancien 94
- A. Constitution d'un transformateur triphasé 94

FIGURE 17 : RÉF. IMG (2240-3058-2296) **96**

Vue éclatée d'un transformateur triphasé de distribution et ses composants 96

- B. Méthodes de refroidissement 96
- SCÉNARIOS ET EXERCICES 97

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

6.4. Rôle dans le Transport et la Distribution de l'Énergie.....99
- a. Le paradoxe de la puissance lointaine.....99
- A. L'élévation de la tension pour le transport (THT).....99
- B. L'abaissement de la tension pour la distribution.....99

FIGURE 18 : RÉF. IMG (1364-0903-5851).....102

Schéma du transport et de la distribution électrique en RDC.....102
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....102

PARTIE III : APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'ÉLECTRICITÉ.....105

a. De la théorie à l'usine.....105

b. Le moteur électrique, cœur de la machine.....105

c. L'art de la commande : logique et protection.....105

d. Le diagnostic, science du mécanicien-électricien.....105

CHAPITRE 7 : L'ÉLECTROTHERMIE : CHAUFFAGE ET SOUDAGE.....106

7.1. Le Chauffage par Résistance (Effet Joule).....106
- a. Un défaut transformé en outil.....106
- A. Le principe physique de l'Effet Joule.....106
- B. Les matériaux des résistances chauffantes.....107

FIGURE 19 : RÉF. IMG (6004-4002-5181).....109

Schéma d'un four industriel à résistances électriques en spirale.....109
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....109

7.2. Le Chauffage par Induction.....111
- a. L'art de chauffer sans flamme.....111
- A. Le Principe de l'Induction Électromagnétique.....111
- B. L'Effet Joule et la Production de Chaleur.....112

FIGURE 20 : RÉF. IMG (0704-6336-1872).....114

Schéma de principe du chauffage par induction sur une pièce métallique.....114
- Scénarios et Exercices.....115
- Une révolution silencieuse dans le Kwilu.....115

7.3. Les Procédés de Soudage Électrique (Arc et Résistance).....116
- a. L'art de fusionner la matière.....116
- A. Le Soudage à l'Arc Électrique.....117

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

FIGURE 21 : RÉF. IMG (1847-8184-2988) **119**

Schéma de principe du poste de soudage à l'arc manuel 119

- B. Le Soudage par Résistance 119

FIGURE 22 : RÉF. IMG (0452-4739-0180) **122**

Principe du soudage par points par résistance 122

- C. Tableau Comparatif Synthétique 122

CHAPITRE 8 : ÉQUIPEMENT ÉLECTRIQUE DES MACHINES-OUTILS **125**

8.1. Distinction entre Circuit de Puissance et Circuit de Commande 125

- Une introduction à la dualité électrique 125
- A. Le Circuit de Puissance : Le Muscle de la Machine 125
- B. Le Circuit de Commande : Le Cerveau de la Machine 125

FIGURE 23 : RÉF. IMG (4184-8067-0821) **128**

Schéma simplifié de démarrage moteur direct un sens de marche 128

- L'anecdote de Tonton Fiston, l'électromécanicien de Lubumbashi 128
- Scénarios et Exercices 129

8.2. Lecture de Schémas Électriques de Machines 130

- a. L'art du déchiffrage 130
- A. Les deux piliers du schéma 130
- B. La grammaire des symboles et le repérage 131

FIGURE 24 : RÉF. IMG (9385-6331-5852) **133**

Symboles normalisés pour contacteur, relais thermique et moteur triphasé 133

- C. La logique de lecture 133

8.3. Les Dispositifs de Protection des Moteurs 135

- a. L'assurance-vie d'une machine 135
- A. La Surcharge et le Court-Circuit : les Deux Ennemis du Moteur 136
- B. Les Organes de Protection Indispensables 136

FIGURE 25 : RÉF. IMG (7170-1032-3290) **138**

Structure et fonctionnement d'un relais thermique pour la protection moteur 138

- Anecdote : Le compresseur capricieux de Mbuta Kabasele 138

8.4. Interfaçage avec les Systèmes Pneumatiques et Hydrauliques 140

- a. Le cerveau et le muscle 140

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- A. L'Électrovanne : Le Point de Contact..... 140
- B. Spécificités Pneumatique et Hydraulique..... 141

PARTIE IV : INTRODUCTION À L'AUTOMATISME ÉLECTROMÉCANIQUE..... 144

De l'outil à la machine autonome..... 144

La Partie Commande et la Partie Opérative..... 144

Le langage de l'électromécanique..... 144

L'automatisme dans l'industrie congolaise..... 144

CHAPITRE 9 : LES COMPOSANTS DE COMMANDE : CONTACTEURS ET RELAIS..... 145

9.1. Le Contacteur Électromagnétique..... 145
- a. L'interrupteur qui refuse de fondre..... 145
- A. Constitution et principe de fonctionnement..... 145
- B. Distinction entre contacts de puissance et contacts auxiliaires..... 145
- SCÉNARIOS ET EXERCICES..... 146

9.2. Le Relais Thermique de Surcharge..... 148
- a. Le gardien silencieux du moteur..... 148
- A. Principe de Fonctionnement : Le Bilame..... 148

FIGURE 26 : RÉF. IMG (3054-5410-5591)..... 150

Vue éclatée d'un relais thermique montrant le principe du bilame..... 150
- B. Caractéristiques et Réglages..... 150

FIGURE 27 : RÉF. IMG (7261-5924-0108)..... 153

Façade d'un relais thermique avec ses boutons de réglage et test..... 153
- b. L'anecdote de la menuiserie de Kisangani..... 153

9.3. Relais Auxiliaires et Blocs de Temporisation..... 155
- a. L'intelligence derrière la force..... 155
- A. Le Relais Auxiliaire : Le Multiplicateur d'Ordres..... 155
- B. Le Bloc de Temporisation : Le Maître du Temps..... 156

CHAPITRE 10 : LES CAPTEURS ET DÉTECTEURS INDUSTRIELS..... 159

10.1. Organes de Commande et Détecteurs de Position Mécaniques..... 159
- a. L'œil mécanique de la machine..... 159
- A. Les organes de commande manuels..... 159
- B. Le détecteur de position mécanique : le fin de course..... 159

FIGURE 28 : RÉF. IMG (5731-8171-4624) **162**

Anatomie d'un détecteur de fin de course mécanique robuste 162

- C. Fonctionnement et symbolisation 162

FIGURE 29 : RÉF. IMG (8964-7369-2855) **164**

Symboles normalisés des contacts de fin de course sur un schéma 164

- Anecdote : Le portail récalcitrant de Matadi 164

10.2. Les Détecteurs de Proximité Statiques 166

- a. L'œil qui ne cligne jamais 166
- A. Le principe de la détection statique 166
- B. Le Détecteur Inductif : Le Spécialiste des Métaux 167

FIGURE 30 : RÉF. IMG (4473-5400-0250) **169**

Schéma de principe du détecteur de proximité inductif 169

- C. Le Détecteur Capacitif : Le "Touche-à-tout" 169

FIGURE 31 : RÉF. IMG (7928-0956-4588) **170**

Principe de détection de niveau par un capteur capacitif 170

- SCÉNARIOS ET EXERCICES 170

10.3. Les Capteurs de Processus : Pression, Température, Niveau 172

- a. Les yeux et les mains de l'automate 172
- A. Les Capteurs de Pression (Manostats) 172

FIGURE 32 : RÉF. IMG (6745-6728-5297) **174**

Schéma de principe d'un capteur de pression à membrane déformable 174

- B. Les Capteurs de Température (Thermostats) 174

FIGURE 33 : RÉF. IMG (3201-6880-4004) **176**

Structure interne d'un capteur de température de type thermocouple industriel 176

- C. Les Capteurs de Niveau 176

CHAPITRE 11 : LOGIQUE CÂBLÉE ET SCHÉMAS DE COMMANDE **179**

11.1. Les Fonctions Logiques de Base (ET, OU, NON) 179

- a. Le raisonnement binaire avant l'électronique 179
- A. La Fonction ET (Série) 179
- B. La Fonction OU (Parallèle) 179

- C. La Fonction NON (Inversion)..... 179

FIGURE 34 : RÉF. IMG (7380-1620-0642)..... 180

Schémas électriques des trois fonctions logiques de base..... 180

- b. Scénarios et Exercices..... 180

11.2. Le Schéma d'Auto-Maintien (Mémoire)..... 182

- a. L'ancêtre mécanique de la mémoire..... 182
- A. Le Problème : L'Ordre qui s'oublie..... 182
- B. La Solution : Le Contact de Maintien..... 182

FIGURE 35 : RÉF. IMG (2420-2175-4057)..... 185

Schéma de commande d'un circuit d'auto-maintien avec ses composants principaux..... 185

- L'anecdote de l'ingénieur de la SNEL..... 185

11.3. Les Verrouillages Électriques..... 187

- a. Le principe de non-contradiction..... 187
- A. Principe et Utilité du Verrouillage..... 188
- B. Réalisation Pratique du Verrouillage Électrique..... 188

FIGURE 36 : RÉF. IMG (2747-1755-2902)..... 190

Schéma de commande avec verrouillage par boutons-poussoirs doubles..... 190

FIGURE 37 : RÉF. IMG (4510-0954-2579)..... 192

Circuit de commande avec verrouillage électrique par contacts auxiliaires cro..... 192

- Anecdote : La Gaffe de l'Apprenti Mfumu à Matadi..... 192
- Scénarios et Exercices..... 193

11.4. Lecture et Conception de Schémas Développés..... 194

- a. Le langage universel du technicien..... 194
- A. La Lecture : Décomposer pour Comprendre..... 194

FIGURE 38 : RÉF. IMG (0521-3439-0009)..... 197

Anatomie d'un schéma développé simple : démarrage direct d'un moteur..... 197

- B. La Conception : Traduire une Logique en Schéma..... 197

CHAPITRE 12 : ÉTUDES DE CAS D'AUTOMATISATION DE SYSTÈMES..... 200

12.1. Étude : Commande d'un Démarrage Étoile-Triangle Automatique..... 200

- a. Le défi du démarrage des moteurs asynchrones..... 200

- A. Principe du Démarrage Étoile-Triangle.....200

FIGURE 39 : RÉF. IMG (3755-3149-0271).....202

Schéma des couplages étoile (Y) et triangle (Δ) d'un moteur.....202

- B. Séquencement Automatique de la Commande.....202

FIGURE 40 : RÉF. IMG (7340-1201-1226).....205

Schéma de commande simplifié pour un démarrage étoile-triangle automatique.....205

- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....205

12.2. Étude : Automatisation d'une Perceuse Sensitive.....207

- a. De la main à la machine : le gain de la répétabilité.....207
- A. Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF).....208
- B. Architecture Matérielle de l'Automatisme.....208

FIGURE 41 : RÉF. IMG (2870-1625-6771).....210

Schéma de principe de la perceuse sensitive automatisée et ses composants.....210

- b. L'anecdote de l'atelier de Matadi.....210

12.3. Étude : Automatisation d'une Station de Pompage.....212

- a. Le défi de la gestion de l'eau.....212
- A. Cahier des Charges Fonctionnel.....212

FIGURE 42 : RÉF. IMG (9904-6150-4950).....214

Schéma de principe d'une station de pompage avec château d'eau.....214

- B. Le Schéma de Commande Électromécanique.....214

FIGURE 43 : RÉF. IMG (8030-2503-5079).....216

Schéma de commande pour l'automatisation du remplissage d'un réservoir.....216

- C. Fonctionnement du Cycle Automatique.....216
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....217

12.4. Étude : Commande d'une Porte de Garage Automatique.....218

- a. L'effort et l'automatisme.....218
- A. Séquence de fonctionnement et logique de commande.....219

FIGURE 44 : RÉF. IMG (4958-0064-6036).....221

Schéma de principe d'une porte de garage motorisée avec ses capteurs.....221

- B. Schéma de commande à contacteurs.....221

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

FIGURE 45 : RÉF. IMG (2638-1590-2307)..... 224

Circuit de commande électrique pour la montée et la descente d'une porte..... 224

- b. Scénarios et Exercices..... 224

ANNEXES..... 227

Bibliothèque de Schémas de Démarrage Moteur..... 227

- A. Démarrage Direct (DOL - Direct On Line)..... 227
- B. Démarrage Étoile-Triangle (Y-Δ)..... 228
- C. Démarrage par Résistances Statoriques..... 229
- D. Démarrage Électronique (Démarreur Progressif)..... 230

Symboles Normalisés pour Schémas de Commande..... 231

- A. Fondements et Normes de Référence..... 231
- B. Symboles des Contacts Électriques..... 231
- C. Symboles des Organes de Commande..... 232
- D. Symboles des Bobines et Préactionneurs..... 233
- E. Symboles des Appareils de Protection..... 233
- F. Symboles des Dispositifs de Signalisation..... 234

Guide de Dépannage pour la Commande Moteur..... 234

- A. Méthodologie Systématique de Dépannage..... 234
- B. Analyse des Circuits de Puissance et de Commande..... 235
- C. Arbre de Décision : Symptômes et Causes Probables..... 237

PRÉLIMINAIRES

Objectifs Pédagogiques du Cours

1. Maîtrise des concepts fondamentaux

Au terme de ce cours, l'élève de 4ème Mécanique Générale différencie et définit avec précision les grandeurs électriques de base : la tension (U), le courant (I), la résistance (R) et la puissance (P). Il établit les relations mathématiques qui les lient, notamment via la loi d'Ohm ($U = R \times I$). La compréhension des circuits en série et en parallèle est un prérequis consolidé pour aborder des systèmes plus complexes.

2. Développement des compétences d'analyse de circuits

L'acquisition des savoirs théoriques débouche sur une compétence d'analyse. L'élève apprend à lire et interpréter un schéma électrique simple. Il est capable d'identifier les symboles normalisés des composants (résistances, sources, interrupteurs). Il applique les lois fondamentales pour calculer les tensions et courants en divers points d'un montage simple, posant les bases de la méthodologie de dépannage.

3. Acquisition des savoir-faire pratiques et sécuritaires

La finalité du cours est opératoire. L'élève manipule correctement un multimètre pour mesurer les grandeurs électriques sur un circuit réel. Il réalise des montages simples sur platine d'essai en respectant le schéma fourni. Une attention particulière est portée sur l'assimilation des règles de sécurité fondamentales, la reconnaissance des dangers du courant électrique et les gestes de première protection.

Approche Didactique et Méthodologique

1.1. Ancrage Pratique et Raisonnement Inductif

Chaque concept théorique est introduit par une problématique concrète et tangible. Le raisonnement part systématiquement d'un fait observable : un dysfonctionnement sur un tour à Lubumbashi, une nécessité de câblage pour une pompe à Mbandaka, ou une chute de tension dans un atelier à Goma. L'abstraction mathématique et physique vient ensuite pour modéliser,

expliquer et formaliser la solution qui a été intuitivement approchée. Cette démarche inductive ancre durablement le savoir dans la réalité professionnelle de l'apprenant.

1.2. Priorisation de la Compétence Technique

L'objectif final est la maîtrise d'un geste professionnel et d'une procédure sécurisée, non la simple récitation de lois physiques. La méthodologie favorise l'acquisition de compétences techniques identifiées, validables et directement transférables en milieu industriel ou artisanal. L'élève apprend à diagnostiquer une panne, à utiliser un multimètre, à interpréter un schéma, à intervenir sur un coffret et à sécuriser son périmètre de travail.

1.3. Progression Spiralaire et Préparation à la Certification

Construite selon une progression spiralaire, la matière revient sur les notions fondamentales à des niveaux de complexité croissants. Une notion simple abordée en début d'ouvrage devient un paramètre critique dans un système complexe étudié plus loin. Cette structure en couches successives consolide l'apprentissage à long terme et prépare méthodiquement l'élève aux formats d'évaluation et aux exigences de l'Examen d'État (EXETAT).

Contexte Industriel et Sécurité

1.1. De la Théorie à la Pratique Industrielle

L'enseignement de l'électricité pour des mécaniciens généralistes vise une finalité opérationnelle. L'abstraction théorique cède la place à la compréhension fonctionnelle des systèmes électriques intégrés aux machines-outils et aux équipements de production. L'approche est pragmatique : l'élève doit pouvoir lire un schéma simple, identifier les composants majeurs d'une armoire de commande et comprendre le cheminement de l'énergie dans un équipement industriel. Cette contextualisation ancre les savoirs dans la réalité professionnelle du futur technicien de maintenance.

1.2. La Primauté de la Sécurité

Une maîtrise rigoureuse des normes de sécurité électrique constitue le socle indispensable de cette formation. Le mécanicien intervient dans un périmètre où le risque électrique est omniprésent, même lors d'opérations purement mécaniques. L'habilitation et la connaissance des procédures de consignation, de déconsignation et de vérification d'absence de tension (VAT) sont des

compétences transversales non négociables. L'objectif est de prévenir l'accident par une culture du risque systématisée.

1.3. L'Interconnexion des Métiers

Ce préambule établit le dialogue nécessaire entre la maintenance mécanique et l'intervention électrique. Il prépare l'élève à identifier les limites de son champ de compétence. Le but est de former un technicien capable de pré-diagnostiquer une panne d'origine électrique, de sécuriser la zone d'intervention et de collaborer efficacement avec l'électricien ou l'électromécanicien qualifié. La performance industrielle dépend de cette synergie des expertises.

Partie I : Les Machines Tournantes à Courant Alternatif

a. Du courant au mouvement

L'énergie électrique alternative ne sert pas uniquement à éclairer ou à chauffer. Sa force principale réside dans sa capacité à générer un mouvement mécanique rotatif. Une machine tournante est un convertisseur d'énergie. Elle transforme la puissance électrique en puissance mécanique (moteur) ou, inversement, la puissance mécanique en puissance électrique (alternateur). Le simple ventilateur qui rafraîchit une salle d'étude à Mbandaka en est un exemple direct.

b. Deux familles, un même principe

Deux grandes familles de machines dominent le monde industriel et domestique. La machine asynchrone, robuste et économique, est le moteur de travail par excellence. On la trouve dans les ateliers de Matadi comme dans les petites menuiseries de Bukavu. La machine synchrone, plus complexe, offre une vitesse de rotation rigoureusement constante. Elle est indispensable pour les applications de forte puissance et de précision, comme les alternateurs du barrage d'Inga.

c. L'avantage du courant alternatif

La popularité des machines alternatives vient de leur conception ingénieuse et fiable. Un moteur asynchrone, par exemple, est souvent dépourvu de balais et de collecteur, des pièces d'usure. Cette absence de contact frottant réduit les pannes et simplifie la maintenance. Pour un technicien dans le Kasaï, cela signifie une plus grande fiabilité et moins d'interventions coûteuses, un atout majeur pour la production.

d. L'impact sur l'industrie et le quotidien

Ces machines sont le cœur battant de l'économie congolaise. Elles animent les bandes transporteuses dans les carrières du Katanga. Elles actionnent les pompes qui alimentent en eau les quartiers de Kananga. Elles font tourner les broyeurs qui transforment le maïs en farine dans la Province Orientale. Maîtriser leur fonctionnement, c'est détenir une compétence essentielle pour tout technicien mécanicien en RDC.

Chapitre 1 : Le Champ Tournant et le Moteur Asynchrone Triphasé

1.1. Création du Champ Magnétique Tournant

a. Le principe de la rotation sans contact

Un des faits les plus fascinants en électricité est la capacité à créer un mouvement de rotation sans aucun contact mécanique direct. C'est le principe du champ magnétique tournant. Il transforme l'énergie électrique de trois phases en une force invisible qui entraîne le rotor d'un moteur.

Ce phénomène est la clé des moteurs asynchrones, omniprésents dans l'industrie, des pompes à eau au Kwilu aux machines-outils de Lubumbashi. Comprendre sa création est donc essentiel pour tout technicien en mécanique générale.

A. Les Systèmes de Courants Triphasés

Un réseau triphasé équilibré fournit trois tensions sinusoïdales. Ces tensions présentent la même amplitude (valeur maximale) et la même fréquence. Leur particularité est un déphasage temporel constant de 120 degrés (soit $2\pi/3$ radians) les unes par rapport aux autres. Mathématiquement, la somme de leurs valeurs instantanées est toujours nulle, ce qui assure l'équilibre parfait du système.

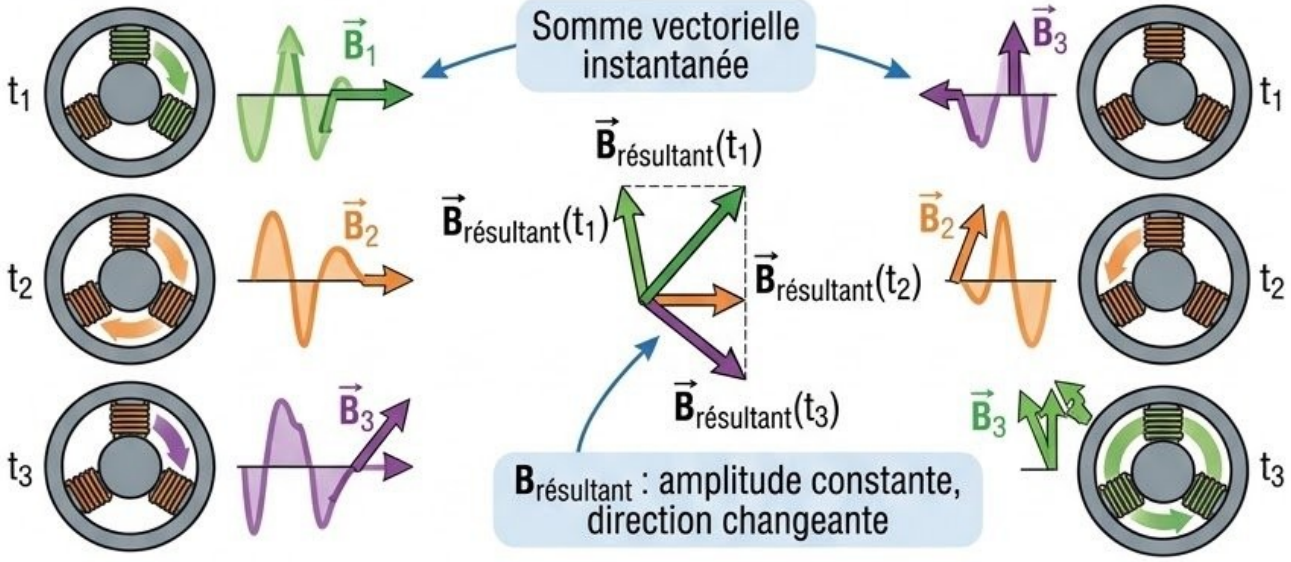
B. Création du Champ par les Bobinages du Stator

Le stator d'un moteur asynchrone contient trois enroulements (ou bobines) physiquement décalés de 120 degrés dans l'espace. Chaque enroulement est alimenté par une des trois phases du réseau électrique. Lorsqu'un courant parcourt une bobine, il génère un champ magnétique dont l'axe est celui de la bobine et dont l'intensité varie de manière sinusoïdale, comme le courant qui le crée.

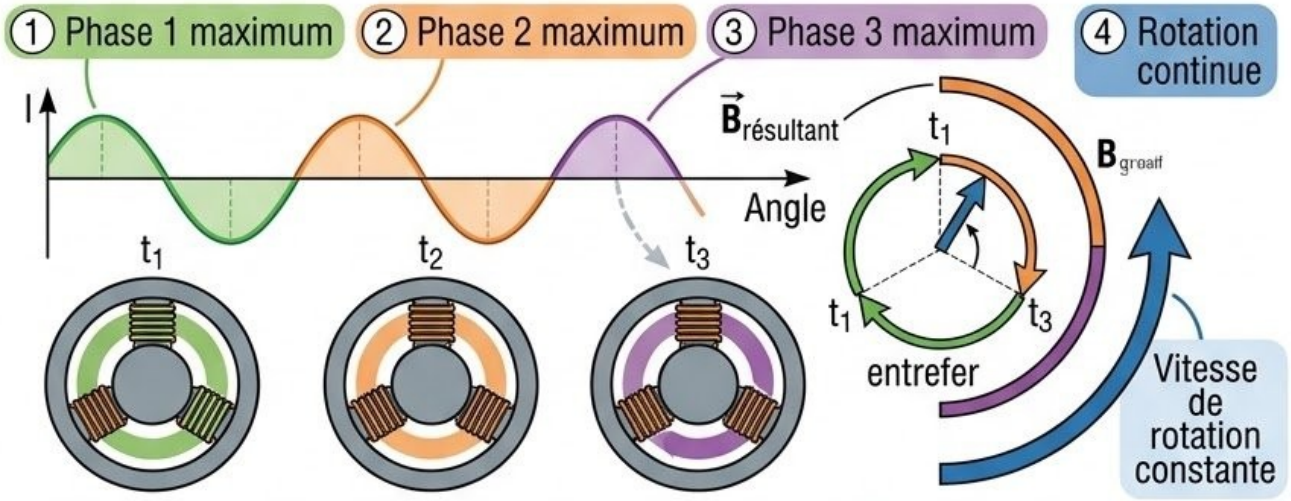
Figure 1 : Réf. IMG (7833-3060-1382)

Composition des trois champs magnétiques pour créer un champ résultant tournant

a. LE CHAMP RÉSULTANT



b. LA ROTATION DU CHAMP

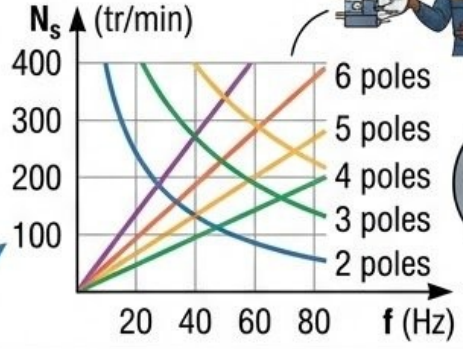


c. LA VITESSE DE SYNCHRONISME

$$N_s = \frac{f \cdot 60}{p}$$

Encodée

Fréquence du réseau électrique



Vitesse de synchronisme (N_s)

C'est la vitesse à laquelle le "manège" magnétique tourne.

Figure 1 : Réf. IMG (7833-3060-1382)

Composition des trois champs magnétiques pour créer un champ résultant tournant

a. Le champ résultant

La somme vectorielle des trois champs magnétiques pulsants (un par bobine) crée à chaque instant un champ magnétique unique, appelé champ résultant. Contrairement aux champs individuels qui oscillent sur un axe fixe, ce champ résultant possède une amplitude constante mais un axe qui change continuellement de direction.

b. La rotation du champ

À mesure que les courants sinusoïdaux varient dans le temps, l'intensité et le sens de chaque champ individuel changent. Cette variation parfaitement synchronisée et décalée provoque la rotation du vecteur du champ résultant à une vitesse constante dans l'entrefer de la machine.

c. La vitesse de synchronisme

Cette vitesse de rotation est directement liée à la fréquence du réseau électrique et à la conception du moteur. Elle est appelée vitesse de synchronisme, notée N_s, et se calcule en tours par minute (tr/min). C'est la vitesse à laquelle le "manège" magnétique tourne.

C. Vitesse de Synchronisme (N_s)

La vitesse de synchronisme est la vitesse de rotation du champ magnétique dans le stator. Elle dépend de deux facteurs : la fréquence f du courant d'alimentation (en Hertz, Hz) et le nombre de paires de pôles p des enroulements.

Sa formule est :

$$N_s = \frac{60 \times f}{p}$$

Avec : - N_s : vitesse de synchronisme en tours par minute (tr/min). - f : fréquence du réseau en Hertz (Hz). En RDC, la fréquence standard du réseau est de 50 Hz. - p : nombre de **paires** de pôles. Un moteur à 2 pôles a $p=1$. Un moteur à 4 pôles a $p=2$. Un moteur à 6 pôles a $p=3$.

SCÉNARIOS ET EXERCICES

Anecdote du technicien de la Tshopo

Papa Mbuyi, un technicien de maintenance chevronné à Kisangani, doit installer une nouvelle motopompe pour un projet d'irrigation. La plaque signalétique du vieux moteur est illisible à cause de la rouille. Il sait que le réseau local est à 50 Hz. En inspectant l'ancien stator, il compte 4 groupes de bobinages principaux, ce qui correspond à 4 pôles. Il en déduit que le nombre de paires de pôles est de 2. Avant même de recevoir le nouveau moteur, il peut déjà affirmer à l'ingénieur du projet : "Le champ magnétique de notre moteur tourne à 1500 tours par minute, donc la nouvelle machine aura une vitesse proche de celle-ci." Il a simplement appliqué la formule de la vitesse de synchronisme pour anticiper les caractéristiques de la machine de remplacement.

Exercice 1 : Le moteur de la minoterie de Kikwit

Énoncé : Maman Hélène gère une petite minoterie à Kikwit. Elle doit remplacer le moteur de son moulin. La plaque du nouveau moteur, alimenté par le réseau 50 Hz, indique qu'il possède 4 pôles. Calculez la vitesse de rotation du champ magnétique dans ce moteur.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identifier les données** La fréquence du réseau est $f = 50$ Hz. Le moteur possède 4 pôles.
2. **Étape 2 : Déterminer le nombre de paires de pôles (p)** Le nombre de paires de pôles est le nombre total de pôles divisé par 2. $p = \frac{4}{2} = 2$. Le moteur a donc 2 paires de pôles.
3. **Étape 3 : Appliquer la formule de la vitesse de synchronisme** La formule est $N_s = \frac{60 \times f}{p}$.
4. **Étape 4 : Calculer le résultat** On remplace les valeurs dans la formule :

$$N_s = \frac{60 \times 50}{2} = \frac{3000}{2} = 1500$$

Le champ magnétique tourne à 1500 tr/min.

Exercice 2 : Le ventilateur de la centrale d'Inga

Énoncé : Un technicien du Kongo Central observe un grand ventilateur de refroidissement à la centrale d'Inga. Le moteur asynchrone qui l'entraîne tourne à une vitesse très proche de 3000 tr/min. Le réseau est bien sûr à 50 Hz. Quel est le nombre de pôles de ce moteur très rapide ?

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Poser l'équation à partir des données connues** Nous savons que la vitesse du champ tournant N_s est d'environ 3000 tr/min et que $f = 50$ Hz. Nous cherchons p.

2. **Étape 2 : Isoler l'inconnue (p)** En partant de la formule $N_s = \frac{60 \times f}{p}$, on peut la transformer pour trouver p :

$$p = \frac{60 \times f}{N_s}$$

3. **Étape 3 : Calculer la valeur de p** On remplace par les valeurs numériques :

$$p = \frac{60 \times 50}{3000} = \frac{3000}{3000} = 1$$

4. **Étape 4 : Interpréter le résultat** La valeur $p = 1$ signifie que le moteur a 1 paire de pôles. Le nombre total de pôles est donc $1 \times 2 = 2$ pôles. C'est la configuration qui permet la plus grande vitesse de rotation pour un moteur sur un réseau 50 Hz.

1.2. Le Moteur Synchrone : Principe et Propriétés

a. Le cousin qui ne plaisante pas avec l'heure

Pendant que le moteur asynchrone "glisse" toujours un peu, son cousin, le moteur synchrone, refuse tout compromis. Il tourne à une vitesse rigoureusement imposée par la fréquence du réseau électrique. C'est un mariage sans divorce entre la vitesse du champ tournant et celle du rotor.

Cette rigidité n'est pas un défaut, mais sa plus grande qualité. Elle est essentielle dans les applications industrielles où la vitesse doit être aussi précise et fiable que le courant du fleuve Congo à Matadi.

A. Principe de fonctionnement : la synchronisation parfaite

Un moteur synchrone fonctionne sur un principe d'accrochage magnétique.

Son stator, alimenté en courant triphasé, crée un champ magnétique tournant. La vitesse de ce champ, appelée vitesse de synchronisme (n_s), est fixe et ne dépend que de la fréquence (f) du réseau et du nombre de paires de pôles (p) du moteur.

$$n_s = \frac{60 \times f}{p}$$

- n_s : vitesse de synchronisme en tours par minute (tr/min)
- f : fréquence du courant d'alimentation en Hertz (Hz)
- p : nombre de paires de pôles du stator

Son rotor est différent de celui d'un moteur asynchrone. Il n'est pas en cage d'écureuil. C'est un électroaimant alimenté en courant continu (on parle d'excitation) ou un ensemble d'aimants permanents. Le champ tournant du stator "agrippe" les pôles du rotor et l'entraîne à sa propre vitesse, sans aucun décalage ni glissement. Le rotor tourne exactement à la vitesse n_s.

Figure 2 : Réf. IMG (3218-4532-7094)

Interaction champ tournant stator et pôles fixes du rotor synchrone

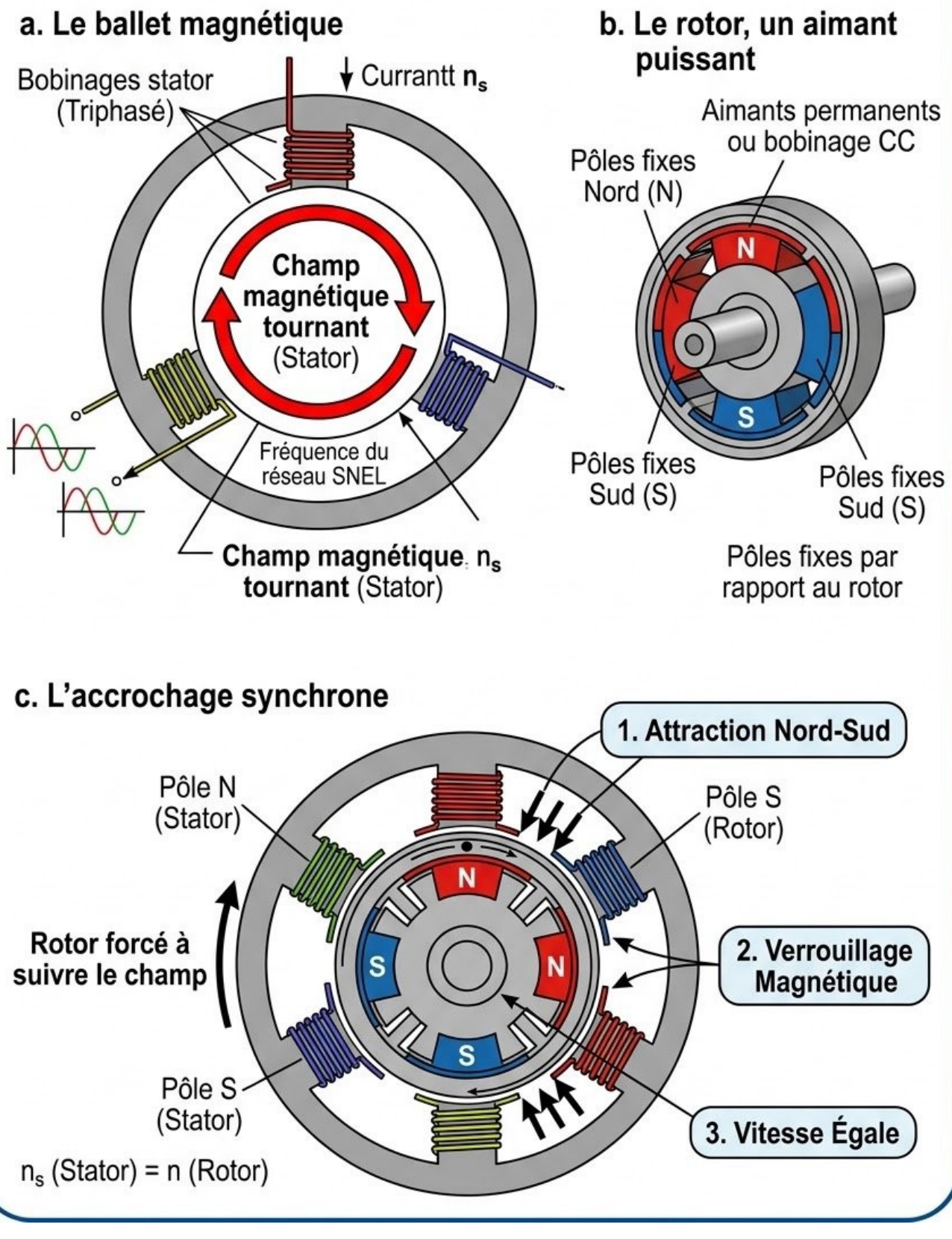


Figure 2 : Réf. IMG (3218-4532-7094)

Interaction champ tournant stator et pôles fixes du rotor synchrone

a. Le ballet magnétique

L'illustration montre les trois bobinages du stator qui, alimentés par un courant triphasé, créent un champ magnétique tournant (flèche rouge circulaire). Ce champ tourne à la vitesse de synchronisme, n_s. Il agit comme un aimant invisible qui balaie l'intérieur du moteur à une vitesse parfaitement régulière, dictée par la fréquence du réseau de la SNEL.

b. Le rotor, un aimant puissant

Au centre, le rotor possède ses propres pôles magnétiques (Nord et Sud). Ces pôles sont fixes par rapport au rotor lui-même. Ils sont créés soit par des aimants permanents, soit par un bobinage alimenté en courant continu. Ce rotor est la pièce qui sera mécaniquement accrochée au champ tournant.

c. L'accrochage synchrone

Le pôle Nord du champ tournant du stator attire le pôle Sud du rotor, et inversement. Le rotor est ainsi "verrouillé" magnétiquement et forcé de suivre la rotation du champ du stator. Il n'a pas le choix : il doit tourner à la même vitesse, sans jamais prendre de retard. C'est le principe même du synchronisme.

B. Propriétés et applications distinctives

Les caractéristiques du moteur synchrone le destinent à des usages spécifiques.

- **Vitesse constante :** Sa vitesse de rotation est insensible aux variations de la charge mécanique. Que le moteur entraîne une petite pompe ou un lourd broyeur, sa vitesse restera n_s, tant que le couple résistant ne dépasse pas son couple de décrochage.
- **Contrôle du facteur de puissance (cos φ) :** C'est sa propriété la plus remarquable. En ajustant le courant d'excitation continu dans le rotor, on peut modifier le facteur de puissance de l'installation. Un moteur synchrone peut se comporter comme une charge inductive, résistive ou même capacitive.

- **Démarrage non autonome :** Le moteur synchrone ne peut pas démarrer seul. Il faut d'abord amener son rotor à une vitesse proche de la vitesse de synchronisme avant de pouvoir "accrocher" le champ tournant. Diverses techniques de démarrage existent pour pallier cet inconvénient.

Quand il est utilisé uniquement pour améliorer le facteur de puissance d'un réseau, sans entraîner de charge mécanique, on l'appelle un **compensateur synchrone**.

SCÉNARIOS ET EXERCICES

Une question de précision à la Gécamines

Dans un atelier de traitement de minerais à Lubumbashi, un long tapis convoyeur doit transporter des roches de tailles différentes vers une station de tri optique. La vitesse du tapis doit être absolument constante pour que le système de caméras et de jets d'air puisse éjecter les bons stériles. Au début, un moteur asynchrone avait été installé. Problème : selon le poids des roches sur le tapis (la charge), la vitesse du moteur variait légèrement à cause du glissement. Cette petite variation suffisait à perturber le tri. Un ingénieur a fait remplacer le moteur asynchrone par un moteur synchrone de même puissance. Immédiatement, le problème a disparu. La vitesse du tapis est devenue aussi stable et prévisible que le lever du soleil sur le Haut-Katanga.

Exercice 1 : La vitesse non-négociable

Énoncé : Un moteur synchrone utilisé dans une usine textile de Kisangani doit faire tourner un métier à tisser à une vitesse parfaitement stable. Il est connecté au réseau électrique de 50 Hz. Son stator est bobiné pour avoir 2 paires de pôles ($p=2$). Quelle sera sa vitesse de rotation ?

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identifier les données pertinentes** La vitesse d'un moteur synchrone ne dépend que de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles.
   - Fréquence, $f=50$ Hz
   - Nombre de paires de pôles, $p=2$

2. **Étape 2 : Appliquer la formule de la vitesse de synchronisme**
   La formule est $n_s = \frac{60 \times f}{p}$.

3. **Étape 3 : Calculer et conclure** On remplace les valeurs dans la formule :

$$n_s = \frac{60 \times 50}{2} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ tr/min}$$

   La vitesse de rotation du moteur sera exactement de 1500 tours par minute, quelle que soit la charge du métier à tisser (dans les limites de puissance du moteur).

Exercice 2 : Le sauveur du réseau de Bandundu

Énoncé : Une grande scierie dans la province du Kwilu, près de Bandundu-ville, utilise de nombreux moteurs asynchrones. Quand ils fonctionnent tous, la tension du réseau local chute de manière visible. Un technicien propose d'installer un gros moteur synchrone, mais de le faire tourner "à vide" (sans entraîner aucune machine). Expliquez pourquoi cette idée, qui semble un gaspillage, est en réalité très intelligente.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Analyser la cause du problème** Le problème est une chute de tension. Elle est causée par la forte consommation de puissance réactive des nombreux moteurs asynchrones. Ces moteurs sont des charges fortement inductives, ce qui dégrade le facteur de puissance (cos φ) du réseau.

2. **Étape 2 : Comprendre le rôle du moteur synchrone "surexcité"** La proposition consiste à utiliser le moteur synchrone comme un "compensateur synchrone". En le faisant fonctionner à vide et en augmentant fortement son courant d'excitation (mode "surexcité"), le moteur synchrone se comporte comme un condensateur.

3. **Étape 3 : Conclure sur l'effet bénéfique** En se comportant comme un condensateur, le moteur synchrone va fournir la puissance réactive que les moteurs asynchrones consomment. Il compense leur effet inductif, améliore le facteur de puissance global de l'installation, réduit l'appel de courant sur la ligne et, par conséquent, stabilise la tension du réseau. L'idée est donc excellente.

1.3. Constitution des Moteurs Asynchrones (Cage et Rotor Bobiné)

a. Une apparence, deux réalités

Même si de l'extérieur, tous les moteurs électriques industriels se ressemblent, leurs architectures internes cachent des mondes de différence. Un moteur asynchrone triphasé, champion de la robustesse, est présent des usines de la GECAMINES à Lubumbashi jusqu'aux scieries de la Tshopo. Sa solidité vient d'une conception brillante.

Sa magie réside dans une construction sans contact électrique direct entre la partie fixe et la partie mobile. Il n'y a ni balais, ni collecteur pour s'user. Le fonctionnement repose sur l'induction électromagnétique entre deux composants principaux : le stator et le rotor. La technologie du rotor définit ensuite les performances et l'usage du moteur.

A. Le Stator : La Source du Champ Tournant

Un stator est la partie fixe et externe du moteur. Son rôle est de générer un champ magnétique tournant lorsqu'il est alimenté par un réseau triphasé.

Physiquement, il se compose d'une carcasse en fonte ou en aluminium qui protège un empilement de tôles d'acier au silicium. Ces tôles sont isolées les unes des autres pour limiter les pertes par courants de Foucault. Des encoches sont découpées dans ce cylindre pour y loger trois enroulements de fils de cuivre. Ces trois bobinages sont décalés géométriquement et électriquement de 120° les uns par rapport aux autres, correspondant aux trois phases du réseau.

B. Le Rotor : Deux Technologies pour une Rotation

Le rotor est la partie mobile, placée à l'intérieur du stator. Il est soumis au champ tournant et se met en rotation par induction. Il existe deux grandes familles de rotors.

a. Le rotor à cage d'écureuil

C'est la technologie la plus répandue pour sa simplicité, sa robustesse et son faible coût. Le rotor est constitué d'un empilement de tôles ferromagnétiques, comme le stator.

Des barres conductrices en aluminium ou en cuivre sont insérées dans les encoches du rotor. Ces barres sont ensuite court-circuitées à leurs deux extrémités par deux anneaux conducteurs. L'ensemble forme une structure qui ressemble à une cage d'écureuil, d'où son nom. Ce type de rotor ne possède aucune connexion électrique avec l'extérieur.

b. Le rotor bobiné

Plus complexe et plus coûteux, le rotor bobiné est réservé à des applications spécifiques. Au lieu de barres en court-circuit, il possède de véritables enroulements triphasés, similaires à ceux du stator.

Les extrémités de ces enroulements ne sont pas court-circuitées directement. Elles sont connectées à un système de trois bagues collectrices solidaires de l'arbre. Des balais (ou charbons) frottent sur ces bagues pour assurer une connexion électrique avec l'extérieur. Cet accès permet d'insérer un rhéostat de démarrage dans le circuit rotorique pour contrôler le couple au démarrage et limiter l'appel de courant.