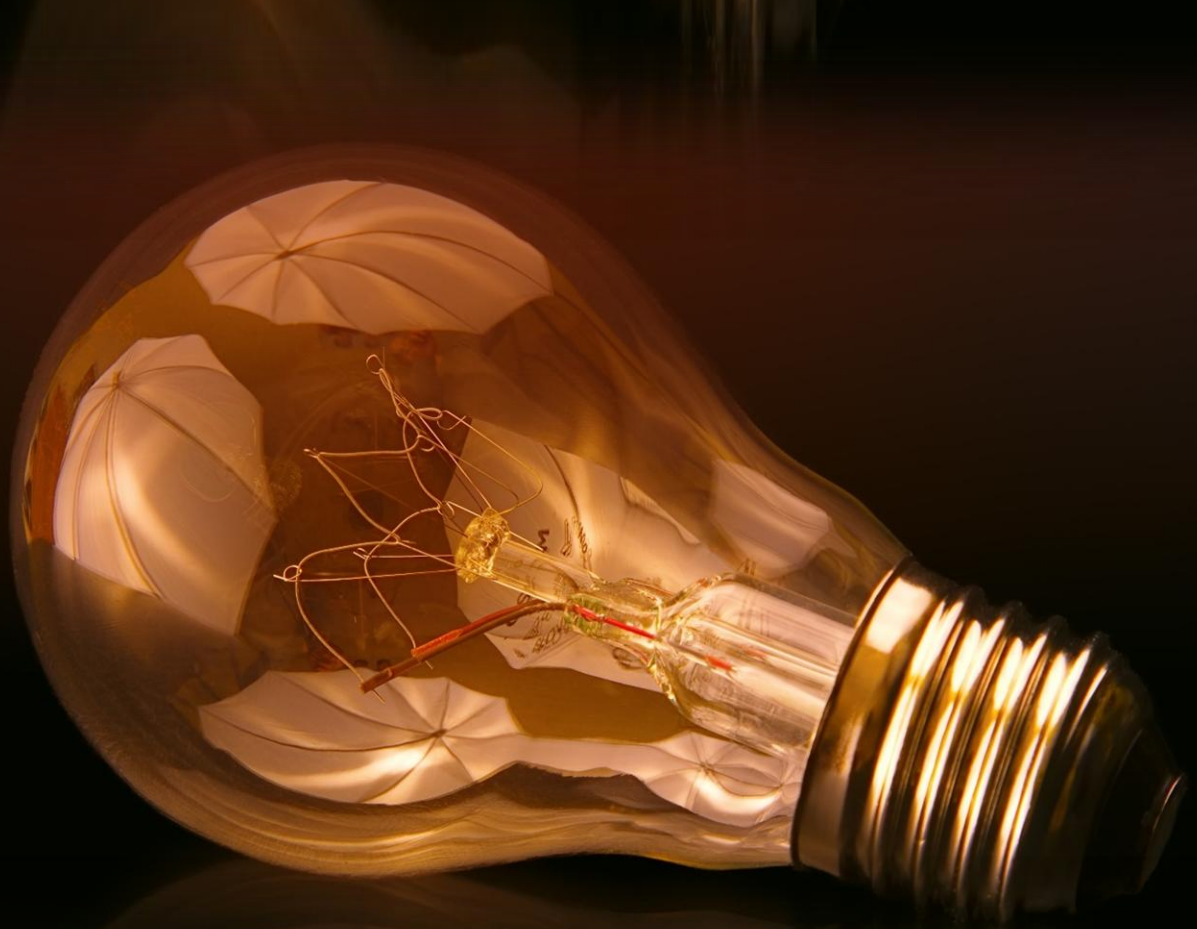


Electricité Générale

CONFORME AU PROGRAMME NATIONAL

3ème Année

Option Electricité

EDITION 2025



TABLE DES MATIÈRES

PRÉLIMINAIRES **1**

1. Objectifs Généraux du Cours 1
   - 1.1. Maîtrise des Fondements Théoriques 1
   - 1.2. Développement des Compétences Analytiques 1
   - 1.3. Application aux Systèmes Électrotechniques 1
2. Approche Pédagogique Recommandée 1
   - 2.1. Du Phénomène Observable au Modèle Théorique 1
   - 2.2. Le Cycle Pédagogique en Trois Temps 2
   - 2.3. Primauté des Travaux Pratiques et de la Sécurité 2
3. Prérequis du Cours 2
   - 3.1. Maîtrise des Outils Mathématiques 2
   - 3.2. Consolidation des Principes d'Électrocinétique 3
   - 3.3. Familiarité avec l'Analyse de Circuits 3

PARTIE 1. INTRODUCTION AU COURANT ALTERNATIF MONOPHASÉ **4**

a. La fin du règne du courant continu 4

b. La valse des électrons : la sinusoïde 4

c. Les nouvelles grandeurs à maîtriser 4

d. Du transformateur à la parcelle 4

CHAPITRE 1. PRODUCTION ET AVANTAGES DU COURANT ALTERNATIF **5**

1.1. Le Principe de l'Alternateur 5
   - a. Le secret du mouvement et de l'aimant 5
   - A. Le Phénomène d'Induction Électromagnétique 5
   - B. Structure et Fonctionnement de l'Alternateur Élémentaire 5

FIGURE 1 : RÉF. IMG (6474-7434-6353) **7**

Schéma de principe d'un alternateur monophasé avec sa tension sinusoïdale 7
   - Scénarios et Exercices 7
   - Une panne au port de Matadi 7

1.2. Avantages du Courant Alternatif pour le Transport d'Énergie 9
   - a. L'enjeu du transport de l'électricité 9

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- A. La simplicité de la transformation de tension.....9
- B. La réduction des pertes par effet Joule.....9
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....10

1.3. Les Effets Comparés du Courant Alternatif et Continu.....12

- a. Un duel historique pour nos prises électriques.....12
- A. L'Effet Chimique (Électrolyse).....12
- B. L'Effet Thermique (Effet Joule).....12

FIGURE 2 : RÉF. IMG (0353-5371-2858).....14

Schéma comparatif des réactions musculaires au courant continu et alternatif.....14

- C. L'Effet Magnétique.....14

1.4. Sécurité Spécifique aux Installations Alternatives.....16

- a. L'avertissement silencieux.....16
- A. Les Dangers Physiologiques du Courant Alternatif.....17

FIGURE 3 : RÉF. IMG (3928-5502-1616).....19

Schéma du parcours du courant dans le corps lors d'une électrisation.....19

- B. Les Dispositifs de Protection Essentiels.....19

FIGURE 4 : RÉF. IMG (2764-5971-6368).....22

Principe de fonctionnement du disjoncteur différentiel et de la mise à la terre.....22

- b. Scénarios et Exercices.....22

CHAPITRE 2. GRANDEURS SINUSOÏDALES ET REPRÉSENTATIONS.....25

2.1. Définition Mathématique et Caractéristiques (Amplitude, Pulsation, Fréqu.....25

- a. L'onde et le fleuve.....25
- A. L'équation mathématique du temps.....25
- B. Les trois caractéristiques fondamentales.....25

FIGURE 5 : RÉF. IMG (8601-3753-6134).....28

Représentation graphique d'une tension alternative sinusoïdale et ses paramètres.....28

- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....28

2.2. La Notion de Valeur Efficace.....30

- a. Une comparaison trompeuse.....30
- A. Définition par l'équivalence énergétique (Effet Joule).....30

FIGURE 6 : RÉF. IMG (7060-6271-5877).....33

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Comparaison de l'effet Joule entre courant continu et courant alternatif.....33
- B. Relation mathématique pour un signal sinusoïdal.....33

2.3. Déphasage entre Deux Grandeurs (Avance, Retard, Phase).....36
- a. Le décalage temporel des signaux.....36
- A. Définition mathématique du Déphasage (φ).....36
- B. Interprétation physique : Avance, Retard et Phase.....36

FIGURE 7 : RÉF. IMG (6518-1005-5763).....38

Représentation vectorielle de Fresnel du déphasage tension-courant.....38
- #### Anecdote : La synchronisation manuelle des alternateurs à Inga.....38
- ##### Scénarios et Exercices.....39

2.4. La Représentation de Fresnel (Vecteurs Tournants).....40
- a. L'erreur commune : comparer les oranges et les mangues.....40
- A. Principe de la transformation.....41
- B. Le vecteur tournant "photographié".....41

FIGURE 8 : RÉF. IMG (5732-7229-3291).....43

Représentation de Fresnel pour deux tensions déphasées U1 et U2.....43
- C. Utilité pratique : l'addition vectorielle.....43

PARTIE 2. ANALYSE DES CIRCUITS RLC EN MONOPHASÉ.....46

De la Résistance Pure à la Complexité.....46

Le Déphasage : Une Affaire de Rythme.....46

L'Impédance : Plus qu'une simple Résistance.....46

Le Phénomène de Résonance : L'Accord Parfait.....46

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT DES COMPOSANTS R, L, C EN ALTERNATIF.....47

3.1. La Résistance Pure en Régime Sinusoïdal.....47
- a. Le cas de la cuisinière électrique.....47
- A. Loi d'Ohm en régime sinusoïdal.....47
- B. Représentation graphique et vectorielle.....47

FIGURE 9 : RÉF. IMG (4381-3455-9098).....49

Tension et courant en phase dans une résistance pure en alternatif.....49
- C. Puissance dans une résistance pure.....49

3.2. La Bobine Parfaite et la Réactance Inductive.....52

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- a. L'inertie du courant électrique.....52
- A. La Bobine Parfaite : L'opposition au changement.....52
- B. La Réactance Inductive () : L'ennemie du courant alternatif.....52
- C. Le Déphasage : La tension mène la danse.....53

FIGURE 10 : RÉF. IMG (0380-0837-4697).....55

Déphasage tension-courant de 90° dans une bobine parfaite.....55
- L'anecdote de Papa Édouard à Isiro.....55

3.3. Le Condensateur Parfait et la Réactance Capacitive.....57
- a. L'énergie qui attend son heure.....57
- A. Le condensateur en régime sinusoïdal.....57

FIGURE 11 : RÉF. IMG (5337-6942-8362).....59

Déphasage courant-tension dans un condensateur parfait.....59
- B. La réactance capacitive ().....59

3.4. L'Impédance Complexe et la Loi d'Ohm Généralisée.....62
- a. Le paradoxe du courant alternatif.....62
- A. La naissance de l'impédance complexe ().....62

FIGURE 12 : RÉF. IMG (7522-6495-0991).....64

Le triangle des impédances pour un circuit RLC série.....64
- B. La loi d'Ohm généralisée.....64

CHAPITRE 4. LES CIRCUITS RLC ET LA RÉSONANCE.....67

4.1. Le Circuit RLC Série : Calcul de l'Impédance Totale.....67
- a. L'opposition des composants.....67
- A. La Composition Vectorielle des Tensions.....67
- B. La Définition de l'Impédance Totale (Z).....67

FIGURE 13 : RÉF. IMG (3868-4219-7753).....70

Triangle des impédances pour un circuit RLC série.....70
- C. L'Angle de Déphasage (Phi).....70

4.2. Construction du Diagramme de Fresnel des Tensions (RLC Série).....72
- a. Représenter pour comprendre.....72
- A. Le courant comme référence universelle.....73

FIGURE 14 : RÉF. IMG (2906-7410-9250).....75

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Vecteurs de tension et de courant dans un circuit RLC série....75
- B. Le duel des tensions réactives....75

FIGURE 15 : RÉF. IMG (2201-6567-3742)....78

Les trois cas du diagramme de Fresnel pour un circuit RLC....78
- C. Application par le théorème de Pythagore....78

4.3. Le Phénomène de Résonance en Intensité....81
- a. L'analogie de la radio....81
- A. Condition de Résonance....81
- B. L'Impédance et le Courant à la Résonance....81

FIGURE 16 : RÉF. IMG (8375-8942-7589)....84

Courbe de résonance montrant le pic d'intensité à la fréquence f0....84

FIGURE 17 : RÉF. IMG (3544-0236-4096)....86

Schéma d'un circuit RLC série alimenté par une source de tension....86
- Scénarios et Exercices....86
- Une panne de signal à la RTNC....86

4.4. Facteur de Qualité (Surtension) et Bande Passante....88
- a. L'acuité de la résonance....88
- A. Le Facteur de Qualité (Q) ou Coefficient de Surtension....88
- B. La Bande Passante (BP)....89

4.5. Le Circuit RLC Parallèle et la Résonance en Courant....92
- a. L'analogie du grand marché....92
- A. L'admittance du circuit RLC parallèle....92

FIGURE 18 : RÉF. IMG (3806-3895-2107)....94

Schéma d'un circuit RLC parallèle alimenté par une source de tension....94
- B. La résonance en courant ou "anti-résonance"....94

FIGURE 19 : RÉF. IMG (2724-8453-2678)....97

Courbe de la réponse en courant d'un circuit RLC parallèle....97
- b. L'anecdote de la vieille radio de Kisangani....97

CHAPITRE 5. PUISSANCES ET FACTEUR DE PUISSANCE EN MONOPHASÉ....100

5.1. La Puissance Instantanée et la Puissance Active (W)....100

- a. Une histoire d'énergie et de travail.....100
- A. La Puissance Instantanée p(t).....100
- B. La Puissance Active P (le travail utile).....100

FIGURE 20 : RÉF. IMG (1778-3212-1524).....103

Courbes de tension, courant et puissance instantanée dans un circuit RL.....103
- Scénarios et Exercices.....103

5.2. La Puissance Réactive (VAR).....105
- a. L'énergie fantôme du réseau.....105
- A. Définition et rôle de la puissance réactive.....105
- B. Le triangle des puissances.....106

FIGURE 21 : RÉF. IMG (9055-0629-4491).....108

Triangle des puissances en courant alternatif monophasé.....108
- C. Calcul et unité de mesure.....108

5.3. La Puissance Apparente (VA) et le Triangle des Puissances.....110
- a. L'illusion de la puissance totale.....110
- A. Définition de la Puissance Apparente (S).....110
- B. Le Triangle des Puissances : une relation géométrique.....111

FIGURE 22 : RÉF. IMG (3951-4044-4976).....112

Le triangle des puissances reliant la puissance active, réactive et apparente.....112
- Anecdote : Le groupe électrogène du mariage à Kananga.....112

5.4. Définition et Importance du Facteur de Puissance.....114
- a. L'énergie utile et l'énergie "fantôme".....114
- A. Définition mathématique et le triangle des puissances.....114

FIGURE 23 : RÉF. IMG (2095-1231-5224).....116

Le triangle des puissances illustrant le facteur de puissance cos φ.....116
- B. Importance technique et économique.....116

FIGURE 24 : RÉF. IMG (4450-8392-2652).....119

L'analogie de la bière pour le facteur de puissance.....119
- b. La facture salée de Papa Tshimanga à Lubumbashi.....119

CHAPITRE 6. AMÉLIORATION DU FACTEUR DE PUISSANCE.....122

6.1. Causes et Inconvénients d'un Mauvais Facteur de Puissance....122
- a. Le voleur silencieux du réseau électrique....122
- A. Les origines du déphasage : Charges inductives....122

FIGURE 25 : RÉF. IMG (1682-7978-1340)....124

Le triangle des puissances, une géométrie fondamentale en électricité....124
- B. Les conséquences techniques et financières....124

FIGURE 26 : RÉF. IMG (6591-0231-7961)....125

Impact d'un mauvais facteur de puissance sur une installation électrique....125
- Anecdote, Scénarios et Exercices....125
- L'atelier de menuiserie de Papa Kanku à Kananga....125

6.2. Principe de la Compensation d'Énergie Réactive....127
- a. L'énergie utile et l'énergie "fantôme"....127
- A. La Nature du Problème : Le Facteur de Puissance ()....127
- B. Le Principe de la Compensation : Une Solution Locale....128

FIGURE 27 : RÉF. IMG (5532-5380-0194)....130

Circuit R-L avant et après compensation par condensateur en parallèle....130
- L'énigme de la facture de la minoterie de Kikwit....130

6.3. Calcul de la Batterie de Condensateurs de Compensation....132
- a. Le principe de la "mousse" électrique....132
- A. Analyse par le Triangle des Puissances....133

FIGURE 28 : RÉF. IMG (6544-9786-4453)....135

Triangle des puissances avant et après compensation du facteur de puissance....135
- B. Détermination de la Puissance et de la Capacité....135

FIGURE 29 : RÉF. IMG (3125-3052-7306)....138

Schéma de branchement d'une batterie de condensateurs en parallèle d'une charge....138
- b. Scénarios et Exercices....138

6.4. Applications Industrielles (Moteurs, Ateliers)....140
- a. L'énergie qui ne travaille pas....140
- A. Le moteur, un grand consommateur de puissance réactive....140
- B. La compensation par batterie de condensateurs....140

FIGURE 30 : RÉF. IMG (5281-6612-4428)....143

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Circuit d'un moteur asynchrone avec sa batterie de condensateurs de compensat.....143
- Une facture salée à la scierie de Mbandaka.....143

6.5. Étude de Cas : Bilan Économique d'une Compensation sur Facture SNEL.....146
- a. L'erreur qui coûte cher.....146
- A. Comprendre la facturation de l'énergie réactive par la SNEL.....146
- B. Le calcul du gain économique.....147

PARTIE 3. INTRODUCTION AUX SYSTÈMES TRIPHASÉS.....150

a. Du monophasé au triphasé : une question de puissance.....150

b. La structure d'un réseau triphasé.....150

c. Production et transport de l'énergie.....150

d. Les avantages pour les récepteurs industriels.....150

CHAPITRE 7. PRODUCTION ET CARACTÉRISTIQUES DES TENSIONS TRIPHASÉES.....151

7.1. Le Réseau Triphasé de Tensions Équilibrées.....151
- a. L'avantage du nombre.....151
- A. Définition d'un système triphasé équilibré.....151
- B. Propriété fondamentale : la somme des tensions.....152

FIGURE 31 : RÉF. IMG (6023-5220-0443).....153

Diagramme vectoriel des tensions triphasées équilibrées et leur somme nulle.....153
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....153

7.2. Tensions Simples et Tensions Composées (Relation U = V√3).....155
- a. Deux types de mesures sur une même source.....155
- A. La Tension Simple (V).....155

FIGURE 32 : RÉF. IMG (2865-4869-6341).....157

Diagramme de Fresnel des tensions simples triphasées équilibrées V1, V2, V3.....157
- B. La Tension Composée (U).....157

FIGURE 33 : RÉF. IMG (6236-1876-8739).....159

Construction vectorielle de la tension composée U12 à partir des tensions sim.....159
- C. Démonstration de la Relation U = V√3.....159

7.3. Couplages de la Source : Étoile (Y) et Triangle (Δ).....162
- a. Le principe de la connexion.....162
- A. Le Couplage Étoile (Y).....162

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- B. Le Couplage Triangle (Δ)....162

FIGURE 34 : RÉF. IMG (2914-3923-8239)....165

Schémas comparatifs des couplages étoile et triangle d'une source triphasée....165

- a. Anecdote : La confusion de Maman Hélène à Kikwit....165

7.4. Ordre des Phases et Création du Champ Tournant....167

- a. L'ordre de succession des phases....167
- A. L'Ordre des Phases : Direct et Indirect....167
- B. La Naissance du Champ Magnétique Tournant....167

7.5. Représentation Temporelle et Vectorielle des Grandeurs Triphasées....170

- a. De l'onde à la flèche....170
- A. La représentation temporelle : Les trois vagues sinusoïdales....170

FIGURE 35 : RÉF. IMG (0358-7677-8323)....173

Visualisation des trois tensions sinusoïdales triphasées décalées dans le temps....173

- B. La représentation vectorielle de Fresnel : L'étoile des tensions....173

FIGURE 36 : RÉF. IMG (1995-5040-2784)....176

Diagramme vectoriel de Fresnel pour un système triphasé équilibré direct....176

- SCÉNARIOS ET EXERCICES....176

CHAPITRE 8. COUPLAGES DES RÉCEPTEURS TRIPHASÉS....179

8.1. Le Couplage en Étoile (Y) : Tensions et Courants....179

- a. Le paradoxe de l'équilibre....179
- A. Principe et Structure du Couplage Étoile (Y)....179

FIGURE 37 : RÉF. IMG (3159-1052-2151)....180

Schéma de principe d'un couplage étoile équilibré avec tensions et courants....180

- B. Relations Fondamentales en Couplage Étoile Équilibré....180
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....181

8.2. Le Couplage en Triangle (Δ) : Tensions et Courants....183

- a. Le principe du montage "bout-à-bout"....183
- A. Relation entre Tensions Composées (V) et Tensions Simples (U)....183
- B. Relation entre Courants de Ligne (I) et Courants de Phase (J)....183

8.3. Comparaison des Puissances Absorbées en Étoile et Triangle....186

- a. Une question d'équilibre et de puissance....186

- A. Puissance Active Absorbée en Couplage Étoile (Y).....186

FIGURE 38 : RÉF. IMG (8590-7232-9773).....188

Schéma d'un récepteur triphasé équilibré couplé en étoile (Y).....188

- B. Puissance Active Absorbée en Couplage Triangle (Δ).....188

FIGURE 39 : RÉF. IMG (0342-6579-8206).....191

Schéma d'un récepteur triphasé équilibré couplé en triangle (Δ).....191

- C. Le Rapport de Puissance : La Conclusion Mathématique.....191

8.4. Cas des Récepteurs Déséquilibrés et Rôle du Neutre.....193

- a. La quête de l'équilibre.....193
- A. Le déséquilibre : une anarchie électrique.....193

FIGURE 40 : RÉF. IMG (1021-4915-1591).....196

Schéma d'un couplage étoile déséquilibré avec fil de neutre.....196

- B. Le neutre : le garant de la stabilité.....196

FIGURE 41 : RÉF. IMG (6588-2995-9700).....199

Comparaison des tensions dans un système déséquilibré avec et sans neutre.....199

- b. L'anecdote de la cyber-boutique à Kananga.....199

8.5. Le Démarrage Étoile-Triangle des Moteurs Asynchrones.....201

- a. La force brute et ses limites.....201
- A. Principe du Démarrage Étoile-Triangle (Y-Δ).....202

FIGURE 42 : RÉF. IMG (6634-1813-3411).....203

Schéma de puissance et commande du démarrage étoile-triangle.....203

- B. Avantages et Inconvénients.....203

CHAPITRE 9. PUISSANCES ET MESURES EN RÉGIME TRIPHASÉ.....206

9.1. Formule de la Puissance Active Triphasée.....206

- a. La puissance, une réalité tangible.....206
- A. Démonstration et formule fondamentale.....206
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....207

9.2. Formule de la Puissance Réactive Triphasée.....208

- a. La puissance invisible mais indispensable.....208
- A. Définition et Utilité de la Puissance Réactive (Q).....209

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- B. La Formule Mathématique en Triphasé Équilibré.....209

FIGURE 43 : RÉF. IMG (6814-2346-2986).....212

Déphasage entre la tension (V) et le courant (I) dans une charge inductive.....212

- L'anecdote de l'atelier de soudure à Kisangani.....212
- Scénarios et Exercices.....213

9.3. Formule de la Puissance Apparente Triphasée.....214

- a. L'illusion du "juste utile".....214
- A. Définition et Rôle de la Puissance Apparente (S).....214

FIGURE 44 : RÉF. IMG (0327-3313-5920).....216

Relation entre tensions et courants en montage triphasé équilibré.....216

- B. Formule Fondamentale en Triphasé.....216
- C. Relation avec les Puissances Active (P) et Réactive (Q).....216

FIGURE 45 : RÉF. IMG (1604-3223-8233).....219

Triangle des puissances pour un système triphasé.....219

- L'anecdote du groupe électrogène de Lisala.....219

9.4. Mesure de la Puissance : Méthode des Deux Wattmètres.....221

- a. Le défi de la mesure en triphasé.....221
- A. Principe du Théorème de Blondel.....221

FIGURE 46 : RÉF. IMG (8029-4351-0402).....224

Schéma de montage pour la méthode des deux wattmètres sur charge triphasée.....224

- B. Interprétation des lectures et facteur de puissance.....224
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....225

9.5. Interprétation des Indications de la Méthode des Deux Wattmètres.....227

- a. Le dialogue silencieux des wattmètres.....227
- A. La relation mathématique entre les puissances.....227

FIGURE 47 : RÉF. IMG (3471-2473-0949).....229

Diagramme de Blondel et interprétation des lectures de wattmètres.....229

- B. Analyse des cas pratiques.....229

Annexe A : Formulaire de l'Électricien (Monophasé et Triphasé).....231

- A. Régime Monophasé Sinusoïdal.....231
- B. Régime Triphasé Équilibré.....233

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Annexe B : Méthodologie des Diagrammes de Fresnel.....235
- A. Définition et Utilité Fondamentale.....235
- B. Conventions et Règles de Construction.....236
- C. Application aux Circuits Fondamentaux.....237

Annexe C : Mémento des Couplages Étoile et Triangle.....238
- A. Couplage Étoile (Y).....238
- B. Couplage Triangle (Δ).....239
- C. Transformation Étoile-Triangle (Théorème de Kennelly).....240

Annexe D : Lexique des Termes Techniques en Courant Alternatif.....241
- A. Grandeurs Fondamentales du Courant Alternatif Sinusoïdal.....241
- B. Valeurs Caractéristiques et Mesures.....242
- C. Impédance et Représentation Complexe.....243
- D. Les Puissances en Régime Alternatif.....244

PRÉLIMINAIRES

1. Objectifs Généraux du Cours

1.1. Maîtrise des Fondements Théoriques

Le premier axe est l'acquisition des lois fondamentales de l'électrocinétique et de l'électromagnétisme. L'élève démontre une compréhension rigoureuse des régimes continus, sinusoïdaux monophasés et triphasés. Sa maîtrise des théorèmes généraux (Thévenin, Norton, Superposition) devient un prérequis pour toute analyse ultérieure. Ces outils mathématiques et physiques structurent sa capacité à modéliser tout phénomène électrique.

1.2. Développement des Compétences Analytiques

Dépassant la simple restitution de connaissances, la formation développe une compétence analytique. L'élève apprend à décomposer un problème complexe, à identifier les grandeurs pertinentes et à appliquer la méthode de résolution appropriée. Cette logique hypothético-déductive est essentielle pour le diagnostic de pannes et l'optimisation des systèmes. Elle prépare l'élève aux épreuves techniques de l'Examen d'État (EXETAT).

1.3. Application aux Systèmes Électrotechniques

La théorie s'ancre dans l'étude des systèmes technologiques concrets. L'analyse porte sur le fonctionnement, le dimensionnement et la maintenance des machines électriques tournantes (moteurs, alternateurs) et statiques (transformateurs). L'étude des dispositifs de commande, de protection et des principes de l'électronique de puissance complète cette approche. L'objectif final est de former un technicien capable d'intervenir sur des installations industrielles et domestiques réelles.

---

2. Approche Pédagogique Recommandée

2.1. Du Phénomène Observable au Modèle Théorique

L'enseignement de l'électricité générale exige une démarche inductive. Chaque concept théorique est introduit à partir d'une observation pratique ou d'une expérimentation concrète. La formalisation mathématique et la modélisation suivent l'expérimentation. Cette méthode ancre les lois physiques dans le réel

tangible et prévient l'abstraction pure, souvent source de difficultés pour l'apprenant. La théorie devient ainsi la conséquence logique de l'observation.

2.2. Le Cycle Pédagogique en Trois Temps

Une articulation séquentielle structure chaque leçon.

- **Démonstration :** La première phase expose un phénomène ou un montage fonctionnel. L'enseignant réalise une expérience simple, met en évidence un effet ou présente un appareil en fonctionnement.
- **Conceptualisation :** La deuxième phase établit les lois, les schémas normalisés et les formules qui régissent le phénomène observé. La rigueur mathématique est ici essentielle.
- **Application :** La troisième phase consolide les acquis par des exercices de calcul et des manipulations en atelier. Elle valide la compréhension de l'élève.

2.3. Primauté des Travaux Pratiques et de la Sécurité

La manipulation effective des composants et des appareils de mesure est centrale. L'évaluation des compétences pratiques possède un poids équivalent à celui des connaissances théoriques. Une attention rigoureuse est portée aux normes de sécurité électrique en vigueur. L'enseignant veille à l'application systématique des procédures de consignation, de mesure et de manipulation en toute situation. La sécurité des élèves et du matériel est une priorité absolue.

---

3. Prérequis du Cours

3.1. Maîtrise des Outils Mathématiques

La maîtrise des outils mathématiques fondamentaux conditionne la progression dans ce cours. L'élève doit démontrer une aisance avérée dans la résolution d'équations du premier et second degré, ainsi qu'une compréhension fonctionnelle de la trigonométrie. Spécifiquement, la projection de vecteurs et l'utilisation des fonctions sinus, cosinus et tangente sont essentielles pour l'analyse des grandeurs sinusoïdales. Une familiarité avec la représentation des nombres complexes (formes algébrique et polaire) constitue un avantage décisif pour l'étude des impédances.

3.2. Consolidation des Principes d'Électrocinétique

Une assimilation rigoureuse des lois fondamentales de l'électrocinétique est non négociable. Ceci concerne principalement les lois d'Ohm, de Joule, et de Kirchhoff (lois des nœuds et des mailles). Leur application dans le cadre des circuits en courant continu doit être fluide et systématique. L'élève doit pouvoir modéliser un problème simple et appliquer ces lois pour en déduire les grandeurs inconnues (courant, tension, puissance). Ces principes forment le socle sur lequel les concepts plus avancés du courant alternatif seront bâtis.

3.3. Familiarité avec l'Analyse de Circuits

La capacité à analyser des circuits électriques résistifs simples est une compétence attendue. Cela inclut le calcul des résistances équivalentes pour des groupements en série, en parallèle et mixtes. La détermination des courants et des tensions dans des réseaux maillés simples est également un prérequis. Les modèles équivalents de Thévenin et de Norton, appliqués à des portions de circuit en courant continu, doivent être compris dans leur principe et leur application. Ces schémas d'analyse seront complexifiés et étendus tout au long de l'année.

Partie 1. Introduction au Courant Alternatif Monophasé

a. La fin du règne du courant continu

L'étude du courant continu a occupé les années précédentes. Ses applications, des lampes torches aux téléphones, sont vitales. Sa principale limite reste le transport sur de longues distances. Le courant alternatif monophasé apporte une solution élégante à ce problème. Il est au cœur du réseau électrique national, de la centrale hydroélectrique d'Inga jusqu'à la prise murale d'une maison à Mbandaka.

b. La valse des électrons : la sinusoïde

Contrairement à une pile, une source alternative génère une tension qui change de polarité. Les électrons dans le fil ne s'écoulent pas dans un seul sens. Ils effectuent un mouvement de va-et-vient régulier. Cette oscillation, lorsqu'on la représente graphiquement en fonction du temps, dessine une courbe spécifique. Cette courbe est la sinusoïde, la signature visuelle du courant alternatif.

c. Les nouvelles grandeurs à maîtriser

Cette nature cyclique impose de nouvelles grandeurs physiques. La tension atteint une valeur maximale (ou amplitude). La durée d'un cycle complet se nomme la période (T). Le nombre de cycles effectués chaque seconde est la fréquence (f), mesurée en Hertz (Hz). Enfin, la valeur efficace représente la grandeur qui produirait le même effet thermique en courant continu. C'est elle qui est indiquée sur nos appareils.

d. Du transformateur à la parcelle

L'atout majeur du courant alternatif réside dans la facilité de modification de sa tension. Le transformateur, appareil central de cette section, permet d'élever ou d'abaisser la tension avec une grande efficacité. Cette propriété rend possible le transport de l'énergie sur des centaines de kilomètres, depuis la centrale jusqu'au quartier. Le courant alternatif monophasé alimente ainsi la quasi-totalité des foyers et des petits ateliers du pays.

Chapitre 1. Production et Avantages du Courant Alternatif

1.1. Le Principe de l'Alternateur

a. Le secret du mouvement et de l'aimant

Un des faits les plus fondamentaux de l'électricité moderne fut découvert par Michael Faraday. Il a démontré qu'un simple mouvement mécanique pouvait engendrer un courant électrique. Nul besoin de réaction chimique comme dans une pile. Le simple déplacement d'un aimant à proximité d'un fil de cuivre suffit.

Cette relation entre magnétisme et électricité est la pierre angulaire de la production d'énergie à grande échelle. Toutes les centrales hydroélectriques, comme celles d'Inga au Kongo Central ou de Ruzizi dans le Sud-Kivu, exploitent ce principe. Elles transforment une énergie mécanique (la force de l'eau) en énergie électrique.

A. Le Phénomène d'Induction Électromagnétique

La production de tension dans un alternateur obéit à la loi de l'induction de Faraday. Une tension électrique apparaît aux bornes d'un circuit conducteur lorsque le flux magnétique qui le traverse varie. Cette tension est appelée force électromotrice (f.é.m.) induite.

Pour créer cette variation de flux, deux éléments sont essentiels et doivent être en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre : - **L'inducteur** : C'est la partie qui crée le champ magnétique. Il peut s'agir d'un aimant permanent ou, plus souvent, d'un électroaimant. - **L'induit** : C'est le circuit conducteur, généralement une ou plusieurs bobines de fil de cuivre, dans lequel la tension est générée.

En faisant tourner l'inducteur devant l'induit (ou l'inverse), le champ magnétique "vu" par les bobines change constamment. Cette variation continue génère une tension électrique.

B. Structure et Fonctionnement de l'Alternateur Élémentaire

Physiquement, un alternateur est constitué de deux parties principales : - **Le stator** : La partie fixe de la machine. - **Le rotor** : La partie mobile, entraînée en rotation par une source d'énergie mécanique (turbine, moteur diesel…).

Dans les alternateurs industriels, le rotor est l'inducteur (l'électroaimant) et le stator est l'induit (les bobinages fixes). Cette configuration est plus robuste. Le mouvement de rotation du champ magnétique du rotor devant les bobines fixes du stator engendre une tension. Parce que le rotor tourne de façon circulaire et continue, la tension générée n'est pas constante. Elle varie de manière périodique en suivant une forme d'onde appelée sinusoïde. C'est la naissance du courant alternatif sinusoïdal.

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Figure 1 : Réf. IMG (6474-7434-6353)

Schéma de principe d'un alternateur monophasé avec sa tension sinusoïdale.

a. Analyse des composants

Le schéma illustre une spire (un cadre conducteur rectangulaire) placée dans un champ magnétique uniforme, créé par deux pôles d'aimant (Nord et Sud). Cette spire représente l'induit. L'aimant représente l'inducteur. La rotation de la spire est assurée par une force mécanique extérieure. Les balais (ou charbons) et les bagues collectrices assurent la connexion électrique entre la spire en rotation et le circuit extérieur fixe, sans emmêler les fils.

b. Le mouvement rotatif et la variation de flux

Lorsque la spire tourne, l'angle entre sa surface et les lignes de champ magnétique change à chaque instant. Le flux magnétique qui traverse la spire est maximal quand la spire est horizontale et nul quand elle est verticale. Cette variation continue du flux est la condition nécessaire pour induire une tension.

c. La naissance de la sinusoïde

La tension induite est proportionnelle à la vitesse de variation du flux. Quand la spire est verticale, sa vitesse de "coupe" des lignes de champ est maximale, la tension est donc maximale (positive ou négative). Quand la spire est horizontale, sa vitesse de coupe est nulle, la tension s'annule. Ce cycle de montée, descente et inversion à chaque demi-tour dessine parfaitement une onde sinusoïdale.

Scénarios et Exercices

Une panne au port de Matadi

Maman Angélique, technicienne de maintenance au port de Matadi, est appelée en urgence. Un des groupes électrogènes alimentant une grue de déchargement refuse de produire du courant. Le moteur diesel tourne parfaitement à sa vitesse nominale, mais le voltmètre en sortie de l'alternateur indique $0V$. Les novices pensent à un câble coupé. Maman Angélique, elle, sourit calmement. Elle mesure la tension du circuit d'excitation du rotor et

trouve aussi $0V$. Le problème est là. L'électroaimant du rotor n'est pas alimenté. Il ne crée donc aucun champ magnétique. Sans champ magnétique tournant (inducteur), les bobines du stator (induit) ne peuvent subir aucune variation de flux. La loi de Faraday est formelle : pas de variation de flux, pas de tension induite. Le moteur peut tourner jusqu'à demain, l'alternateur ne produira rien.

Exercice 1 : L'alternateur du quartier

Énoncé : Papa Boyoma, à Bandalungwa, possède un petit groupe électrogène pour pallier les coupures. La fiche technique indique : "Rotor à électroaimant tournant, stator à bobinages fixes". Quel est le rôle de chaque partie dans la production d'électricité ?

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identifier l'inducteur** L'inducteur est la source du champ magnétique. La fiche indique un "rotor à électroaimant tournant". Le rotor est donc l'inducteur. C'est son champ magnétique qui va tourner.
2. **Étape 2 : Identifier l'induit** L'induit est le circuit où la tension est générée. La fiche mentionne un "stator à bobinages fixes". Le stator est donc l'induit. Le courant utile est récupéré aux bornes de ses bobines fixes.

Exercice 2 : La forme de la tension

Énoncé : Un élève de l'Institut Technique de Gbadolite branche un oscilloscope à la sortie d'un petit alternateur à manivelle. Il observe une vague qui monte et qui descend. Il se demande pourquoi la tension n'est pas une ligne droite constante, comme celle d'une batterie de téléphone.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Analyser la source du phénomène** Une batterie produit une tension par une réaction chimique statique. Un alternateur produit une tension par un mouvement de rotation. Cette différence fondamentale explique tout.
2. **Étape 2 : Lier la rotation à la tension** Dans l'alternateur, le bobinage tourne face à un aimant (ou l'inverse). L'angle entre le bobinage et le champ magnétique change constamment, de 0° à 360°. Selon la loi de Faraday, la tension induite dépend de cet angle.

3. **Étape 3 : Conclure sur la forme d'onde** La tension est maximale à certains angles (quand le fil coupe les lignes de champ le plus vite) et nulle à d'autres. En tournant, elle passe par un maximum positif, s'annule, atteint un maximum négatif, puis s'annule à nouveau pour recommencer le cycle. Cette variation cyclique est une onde sinusoïdale, pas une valeur constante.

1.2. Avantages du Courant Alternatif pour le Transport d'Énergie

a. L'enjeu du transport de l'électricité

Pendant la fin du 19ème siècle, une véritable "guerre des courants" opposa Thomas Edison, partisan du courant continu (CC), à Nikola Tesla, champion du courant alternatif (CA). Le débat n'était pas philosophique. Il était purement pratique et centré sur l'efficacité du transport de l'énergie.

La vision de Tesla a finalement triomphé pour une raison fondamentale. Pour transporter l'électricité sur de longues distances, depuis une centrale hydroélectrique du Kongo Central jusqu'aux industries de Lubumbashi, il fallait une solution pour minimiser les pertes en ligne. Cette solution est l'avantage décisif du courant alternatif.

A. La simplicité de la transformation de tension

La caractéristique principale du courant alternatif est la capacité de modifier sa tension très facilement. Cette opération s'effectue avec un dispositif statique, robuste et très efficace : le transformateur. Un transformateur peut élever la tension à la sortie d'une centrale de production. Il peut aussi abaisser la tension pour la distribution aux utilisateurs finaux.

Avec le courant continu, modifier la tension est un processus complexe, coûteux et générant des pertes importantes. La technologie des transformateurs est donc intrinsèquement liée au courant alternatif. C'est elle qui rend possible le transport économique de l'énergie électrique sur des centaines, voire des milliers de kilomètres.

B. La réduction des pertes par effet Joule

Toute ligne électrique possède une résistance, notée R. Lorsqu'un courant d'intensité I la traverse, une partie de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur. C'est l'effet Joule. La puissance perdue P_j se calcule avec la formule :

$$P_j = R \cdot I^2$$

Cette équation montre que les pertes ne sont pas proportionnelles à l'intensité, mais au carré de l'intensité. L'objectif est donc de réduire I au maximum.

Or, la puissance transportée P est le produit de la tension U et de l'intensité I ($P = U \cdot I$). Pour transporter une puissance P donnée : - En augmentant la tension U (grâce à un transformateur), on diminue l'intensité I dans les mêmes proportions. - En divisant l'intensité par 10, les pertes par effet Joule sont divisées par 10^2, soit 100.

L'astuce consiste donc à transporter l'électricité sous Très Haute Tension (THT), par exemple 400 000 Volts, pour minimiser l'intensité et donc écraser les pertes.

SCÉNARIOS ET EXERCICES

L'épopée de la ligne Inga-Shaba

La ligne à Très Haute Tension (THT) reliant le barrage d'Inga (Kongo Central) au pôle minier du Katanga est un monument de l'ingénierie. S'étendant sur plus de 1700 kilomètres, elle a été conçue pour résoudre un problème majeur : acheminer une énorme quantité d'énergie avec le moins de pertes possible. La solution technique a été d'utiliser une tension extrêmement élevée, de l'ordre de 500 kV. Sans cette élévation de tension, la quasi-totalité de l'électricité produite à Inga se serait dissipée en chaleur dans les câbles avant d'atteindre sa destination. Chaque pylône que l'on peut voir le long de cette ligne est un témoin silencieux de la victoire sur l'effet Joule, un principe physique que tout électricien doit maîtriser.

Exercice 1 : Le dépanneur de groupe électrogène à Mbandaka

Énoncé : Papa Bolingo, technicien à Mbandaka dans la province de l'Équateur, doit alimenter une sonorisation pour une fête. Son groupe électrogène est puissant, mais il doit utiliser une longue rallonge de 50 mètres pour atteindre la scène. Il constate que le câble de la rallonge chauffe anormalement et que la tension à l'arrivée est trop faible. Expliquez le phénomène en cause.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identification du phénomène** Le câble chauffe à cause de l'effet Joule. L'énergie électrique est convertie en chaleur dans le conducteur.

2. **Étape 2 : Analyse de la cause** La longue rallonge possède une résistance électrique R non négligeable. La sonorisation demande une forte intensité I. La puissance perdue dans le câble, $P_j = R \cdot I^2$, devient significative. Cette puissance perdue se manifeste par un échauffement et provoque une chute de tension le long du câble.

3. **Étape 3 : Lien avec la leçon** Cet exemple illustre à petite échelle le problème du transport de l'énergie. Transporter une puissance à basse tension (220 V) implique une intensité élevée, ce qui maximise les pertes par effet Joule, même sur une distance de 50 mètres.

Exercice 2 : Projet d'électrification rurale près de Mbuji-Mayi

Énoncé : Une ingénieure, Madame Masika, supervise un projet au Kasaï-Oriental. Une petite centrale solaire produit une puissance de 100 kW. Le village à alimenter est situé à 3 km. La résistance totale de la ligne de transport est de 0,8 Ω. Calculez les pertes en ligne si l'énergie est transportée à 400 V, puis à 20 000 V (20 kV).

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Calcul pour la Basse Tension (400 V)** On calcule d'abord l'intensité : $I = P/U = 100\,000\,W / 400\,V = 250\,A$. On calcule ensuite les pertes : $P_j = R \cdot I^2 = 0,8\,\Omega \cdot (250\,A)^2 = 50\,000\,W$. La moitié de la puissance (50 kW) est perdue en chaleur dans le câble. C'est inacceptable.

2. **Étape 2 : Calcul pour la Haute Tension (20 000 V)** On calcule la nouvelle intensité : $I = P/U = 100\,000\,W / 20\,000\,V = 5\,A$. On calcule les nouvelles pertes : $P_j = R \cdot I^2 = 0,8\,\Omega \cdot (5\,A)^2 = 20\,W$. Les pertes sont quasi nulles.

3. **Étape 3 : Conclusion** Le calcul démontre de manière spectaculaire l'avantage de transporter l'électricité sous haute tension. L'utilisation du courant alternatif, qui permet cette transformation de tension via des transformateurs en amont et en aval de la ligne, est la seule solution viable pour un transport efficace de l'énergie.

1.3. Les Effets Comparés du Courant Alternatif et Continu

a. Un duel historique pour nos prises électriques

Même si le courant continu a été le premier à être maîtrisé et commercialisé, notamment par Thomas Edison, son règne fut bref. L'histoire retient une véritable "guerre des courants" à la fin du 19ème siècle, un conflit technologique intense.

Cette bataille a été remportée par le courant alternatif, défendu par Nikola Tesla et l'industriel George Westinghouse. Sa facilité de transformation et de transport sur de longues distances explique pourquoi nos maisons, de Matadi à Kisangani, sont aujourd'hui alimentées en courant alternatif.

A. L'Effet Chimique (Électrolyse)

L'effet chimique d'un courant est sa capacité à décomposer certaines substances liquides conductrices, appelées électrolytes. Ce phénomène est l'électrolyse.

- **En courant continu (CC)** : Les ions positifs se déplacent vers la borne négative (cathode) et les ions négatifs vers la borne positive (anode). Il y a un dépôt de matière ou un dégagement de gaz aux électrodes. C'est le principe de la charge d'une batterie ou du placage de métaux.
- **En courant alternatif (CA)** : La polarité des bornes change constamment (50 fois par seconde pour le réseau de la SNEL). Les ions oscillent sur place sans jamais atteindre une électrode. Le courant alternatif n'a donc pratiquement aucun effet chimique.

B. L'Effet Thermique (Effet Joule)

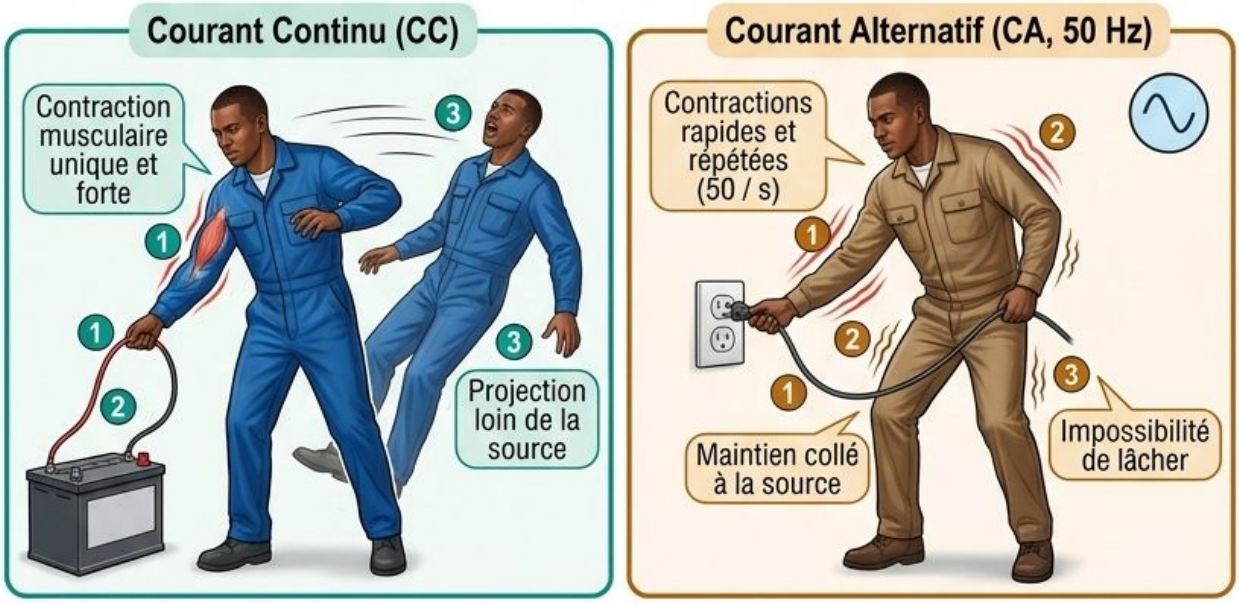
Tout conducteur parcouru par un courant électrique s'échauffe. Cette production de chaleur est l'effet Joule. La puissance dissipée par cet effet est donnée par la loi de Joule : $P = R \cdot I^2$.

Le sens du courant n'intervient pas dans cette formule, car le carré du courant (I^2) est toujours positif. Par conséquent, l'effet thermique se manifeste de manière identique en courant continu et en courant alternatif. Un radiateur, un fer à repasser ou une ampoule à incandescence fonctionnent aussi bien avec l'un qu'avec l'autre.

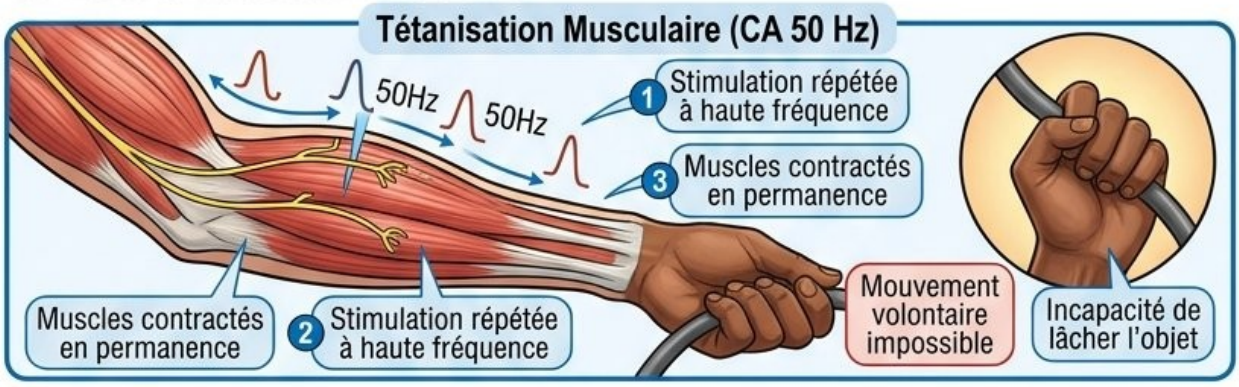
Figure 2 : Réf. IMG (0353-5371-2858)

Schéma comparatif des réactions musculaires au courant continu et alternatif

a. L'électrochoc et la réaction corporelle



b. La tétanisation musculaire



c. Le risque cardiaque (fibrillation)

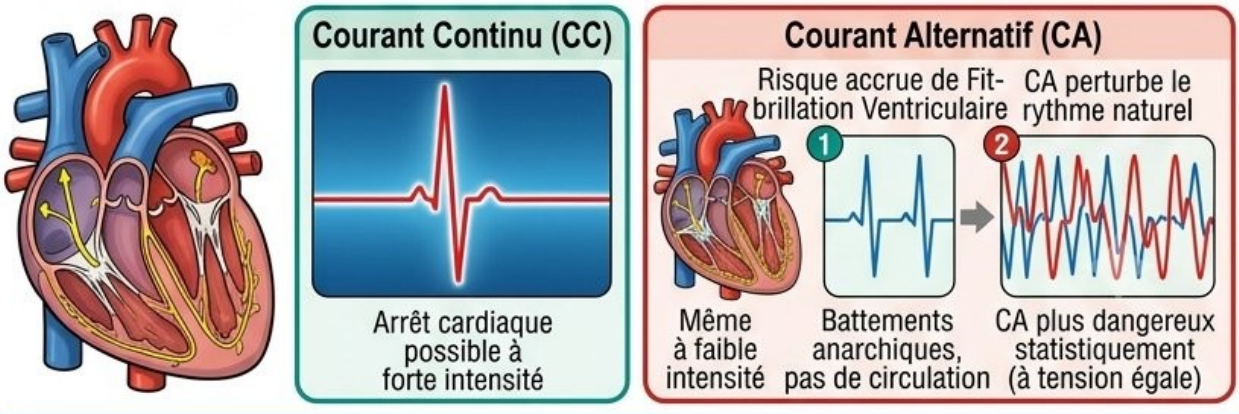


Figure 2 : Réf. IMG (0353-5371-2858)

Schéma comparatif des réactions musculaires au courant continu et alternatif

a. L'électrochoc et la réaction corporelle

Ce schéma illustre la réponse du corps humain à un contact électrique. À gauche, le courant continu (CC) provoque une seule et unique contraction musculaire forte. La victime est souvent projetée loin de la source. À droite, le courant alternatif (CA) entraîne des contractions rapides et répétées, "collant" la victime à la source électrique.

b. La tétanisation musculaire

La fréquence du courant alternatif (50 Hz) est particulièrement dangereuse. Elle provoque un état de "tétanisation" des muscles. Cela signifie que les muscles se contractent 50 fois par seconde, empêchant tout mouvement volontaire. La victime ne peut plus lâcher l'objet sous tension, ce qui prolonge la durée de l'électrisation.

c. Le risque cardiaque (fibrillation)

Le courant alternatif perturbe plus facilement le rythme électrique naturel du cœur. Même un courant de faible intensité peut provoquer une "fibrillation ventriculaire". Le cœur bat de façon anarchique et n'assure plus la circulation sanguine. Cet effet rend le courant alternatif, à tension égale, statistiquement plus dangereux que le courant continu.

■ ■ ■

C. L'Effet Magnétique

Un courant électrique crée toujours un champ magnétique autour du conducteur.

- **En courant continu (CC)** : Le champ magnétique est constant et de polarité fixe. C'est le principe de fonctionnement des électroaimants de levage.
- **En courant alternatif (CA)** : Le champ magnétique varie constamment en intensité et change de sens à la même fréquence que le courant. Ce phénomène est à la base du fonctionnement des transformateurs et des moteurs à courant alternatif.

Anecdote : L'erreur du jeune soudeur de Lemba

À Kinshasa, dans l'effervescence du quartier Lemba, un jeune apprenti nommé Papy devait aider à réparer une grille métallique. Son patron lui confia un poste de soudure à l'arc flambant neuf. Papy, habitué à voir son oncle charger des batteries de voiture avec un chargeur (qui fournit du courant continu), pensa que tous les appareils puissants fonctionnaient en continu. Il tenta de bricoler une alimentation directe depuis une grosse batterie de camion.

Son patron l'arrêta juste à temps, un grand sourire aux lèvres. Il lui expliqua que le transformateur du poste à souder avait besoin du courant alternatif de la prise murale pour fonctionner. Le champ magnétique variable de l'alternatif est essentiel pour élever la tension et générer l'arc puissant. Papy comprit ce jour-là que la nature du courant (alternatif ou continu) détermine la technologie même de l'outil.

Exercice 1 : La batterie de la parcelle à Boma

Énoncé : Maman Hélène, vivant à Boma dans le Kongo Central, possède une batterie de voiture 12V (courant continu). Son fils lui suggère de la recharger en la branchant directement sur une prise murale de la maison, qui délivre du 220V (courant alternatif). Expliquez pourquoi cette idée est à la fois inefficace et dangereuse, en vous basant sur l'un des effets étudiés.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identifier le principe de la recharge** La recharge d'une batterie est un processus chimique (une électrolyse inversée). Elle nécessite un courant qui circule dans un seul sens pour réorganiser les composants chimiques internes.
2. **Étape 2 : Analyser l'effet du courant alternatif** Le courant alternatif change de sens 100 fois par seconde (50 alternances positives, 50 négatives). Il ne peut donc pas provoquer la réaction chimique de recharge, qui exige un flux constant.
3. **Étape 3 : Conclure sur l'inefficacité et le danger** L'opération est inefficace, car l'effet chimique du courant alternatif est nul. La batterie ne se chargera pas. Pire, la tension très élevée (220V) appliquée à une batterie 12V, même en alternatif, peut provoquer une surchauffe extrême (effet Joule) et la destruction, voire l'explosion de la batterie.

Exercice 2 : Le fer à souder de l'atelier à Mbuji-Mayi

Énoncé : Lufundu est un apprenti dans un atelier d'électronique à Mbuji-Mayi (Kasaï-Oriental). Son formateur lui explique que leur vieux fer à souder peut fonctionner indifféremment sur une source 24V alternative ou sur une source 24V continue. Lufundu est perplexe. Expliquez-lui pourquoi, en citant l'effet physique responsable.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identifier le principe de fonctionnement du fer** Un fer à souder fonctionne en convertissant l'énergie électrique en chaleur pour faire fondre l'étain. Le principe physique en jeu est l'effet thermique.
2. **Étape 2 : Analyser l'effet thermique (Effet Joule)** La chaleur produite par effet Joule est proportionnelle au carré de l'intensité du courant ($P = R \cdot I^2$). Comme le carré d'un nombre est toujours positif, le sens du courant (positif en CC, ou alternant en CA) n'a aucune importance.
3. **Étape 3 : Conclure sur la polyvalence de l'appareil** Puisque le fer à souder ne dépend que de l'effet Joule, il chauffe que le courant circule dans un seul sens (CC) ou qu'il change de sens (CA). C'est pourquoi il est compatible avec les deux types de courant, pourvu que la tension efficace (en CA) ou la tension continue soit la même.

1.4. Sécurité Spécifique aux Installations Alternatives

a. L'avertissement silencieux

Lorsque l'on touche la carcasse métallique d'un vieux frigo à Mbandaka et que l'on ressent un petit picotement, ce n'est pas de la magie. C'est le signal d'un défaut d'isolement, une fuite de courant qui cherche le chemin le plus court vers la terre. En courant alternatif, ce phénomène est un avertissement grave.

La nature oscillante du courant alternatif le rend particulièrement redoutable pour l'organisme. Il ne se contente pas de brûler comme le courant continu. Il perturbe le rythme cardiaque et paralyse les muscles. La sécurité dans ce domaine obéit donc à des règles strictes et à des dispositifs non négociables.