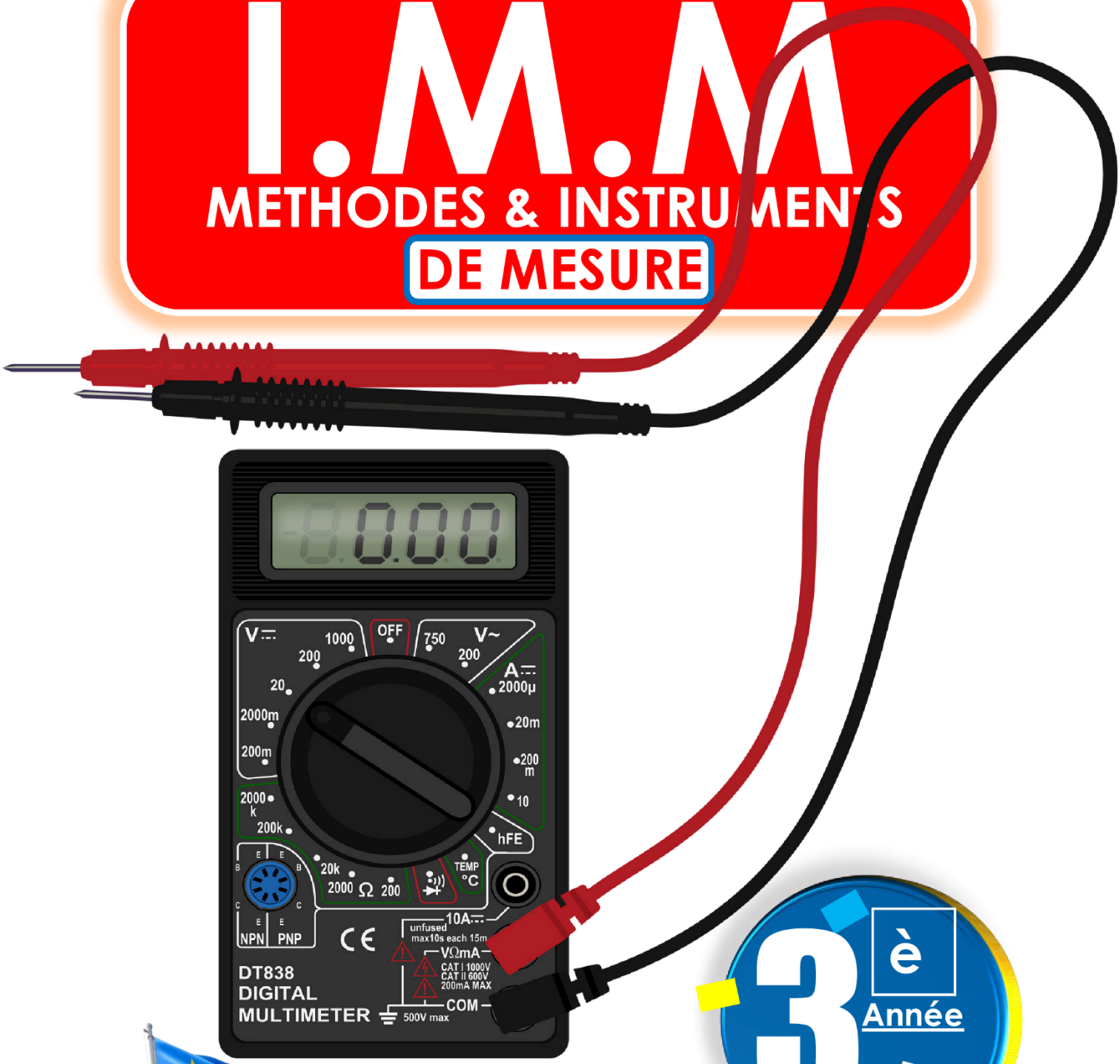
I.M.M

METHODES & INSTRUMENTS DE MESURE



3è Année

Option Electricité

CONFORME AU PROGRAMME NATIONAL

EDITION 2025



TABLE DE MATIERE

PRÉLIMINAIRES 1
1. Objectifs Généraux du Cours 🎯 1
Maîtrise des Outils d'Analyse Complexes : 2
Application aux Systèmes de Puissance (Triphasé & HT) : 2
2. Approche Pédagogique Recommandée 👩‍🏫 3
3. Prérequis du Cours 📚 5
Chapitre 1: Principes et Technologies des Appareils AC 10
1.1. L'Appareil Ferromagnétique (Fer Mobile) 10
- 1.1.1. Principe de fonctionnement 10
- 1.1.2. Construction et amortissement 12
- 1.1.3. Avantages et inconvénients 12
1.2. L'Appareil Électrodynamique 15
- 1.2.1. Principe de fonctionnement 15
- 1.2.2. Application fondamentale : Le Wattmètre 15
- 1.2.3. Autres usages (Voltmètre, Ampèremètre) 16
- 1.2.4. Avantages et inconvénients 16
1.3. Les Appareils à Redresseur et Thermiques 17
- 1.3.1. L'appareil à redresseur 17
- 1.3.2. Le problème de l'étalonnage et l'erreur de forme 18
- 1.3.3. Avantages et inconvénients de l'appareil à redresseur 18
- 1.3.4. L'appareil thermique 19
1.4. Les Instruments Numériques TRMS 20
- 1.4.1. Distinction : "Valeur moyenne" vs "TRMS" 20
- 1.4.2. Technologies de conversion TRMS 20
- 1.4.3. Importance diagnostique du TRMS 21
- 1.4.4. Le Facteur de Crête (Crest Factor) 22
1.5. Ressources complémentaires 23
- 1.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 23
- 1.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 24
- 1.5.3. Scenarios et Exercices 25
Chapitre 2: Normes, Étalonnage et Vérification des Instruments 29
2.1. La Chaîne d'Étalonnage 29

- 2.1.1. Définition de la traçabilité métrologique 29
- 2.1.2. L'importance de la chaîne de raccordement 31
- 2.1.3. Propagation des incertitudes 31

2.2. Procédure d'Étalonnage d'un Voltmètre 33

- 2.2.1. Préparation et équipement requis 33
- 2.2.2. Exécution de la procédure (Exemple : Calibre 10V DC) 33
- 2.2.3. Exploitation des résultats 34
- 2.2.4. La courbe d'étalonnage 34

2.3. Vérification Périodique des Instruments 35

- 2.3.1. Distinction : Étalonnage vs Vérification 35
- 2.3.2. Justification de la périodicité 35
- 2.3.3. Impact sur la qualité et la sécurité 36

2.4. Le Rapport de Vérification 36

- 2.4.1. Contenu d'un certificat d'étalonnage 36
- 2.4.2. Interprétation du rapport 37
- 2.4.3. Gestion du parc d'instruments 37

2.5. Ressources complémentaires 38

- 2.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 38
- 2.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 39
- 2.5.3. Scenarios et Exercices 40

Chapitre 3: L'Oscilloscope Numérique pour l'Analyse des Signaux 46

3.1. Mesures de Tensions et de Temps 46

- 3.1.1. L'interface et les commandes fondamentales 46
- 3.1.2. Utilisation des curseurs pour la mesure d'amplitude 48
- 3.1.3. Utilisation des curseurs pour la mesure temporelle 50

3.2. Mesure de Déphasage 50

- 3.2.1. Méthode temporelle (Mode Y-T) 50
- 3.2.2. Méthode des courbes de Lissajous (Mode X-Y) 51

3.3. Visualisation des Harmoniques (Mode FFT) 52

- 3.3.1. Le contexte des harmoniques 52
- 3.3.2. La fonction FFT (Transformée de Fourier Rapide) 53
- 3.3.3. Analyse d'un spectre FFT 53

3.4. L'Analyseur de Qualité de Réseau 54

- 3.4.1. Les limitations de l'oscilloscope 54
- 3.4.2. L'analyseur de réseau : un instrument spécialisé 54
- 3.4.3. Applications diagnostiques pour le technicien 55

3.5. Ressources complémentaires 56

- 3.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 56
- 3.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 57
- 3.5.3. Scenarios et Exercices 57

Chapitre 4: Les Transformateurs de Mesure (TC/TP) 62

4.1. Rôle et Principe des Transformateurs de Mesure 62

- 4.1.1. La problématique de la mesure en Haute et Moyenne Tension 62
- 4.1.2. Le double rôle d'adaptation et d'isolation 62
- 4.1.3. Compatibilité avec les appareils de mesure et de protection 64

4.2. Le Transformateur de Courant (TC) 64

- 4.2.1. Principe de fonctionnement et construction 64
- 4.2.2. La règle de sécurité fondamentale : Secondaire en charge 67
- 4.2.3. Choix d'un Transformateur de Courant 67

4.3. Le Transformateur de Potentiel (TP) 68

- 4.3.1. Principe de fonctionnement 68
- 4.3.2. Raccordement et protection 69
- 4.3.3. La règle de sécurité : Secondaire non court-circuité 69

4.4. Mise en Œuvre dans les Postes de Transformation 69

- 4.4.1. Contexte : Les cellules Moyenne Tension (MT) 69
- 4.4.2. Le double rôle (Mesure et Protection) 70

4.5. Ressources complémentaires 71

- 4.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 71
- 4.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 72
- 4.5.3. Scenarios et Exercices 72

Chapitre 5: Mesure des Impédances (R, L, C) 77

5.1. Méthode Voltmètre-Ampèremètre en AC 77

- 5.1.1. Principe de la mesure en régime alternatif 77
- 5.1.2. Protocoles de montage et erreurs systématiques 77
- 5.1.3. Importance critique des appareils TRMS 78
- 5.1.4. Limitations de la méthode V-A 78

5.2. Mesure de la Résistance et de la Réactance 80
- 5.2.1. Principe : La dissociation par la puissance active 80
- 5.2.2. Le montage V-A-W (Voltmètre-Ampèremètre-Wattmètre) 80
- 5.2.3. Séquence de calcul pour R et X 82
- 5.2.4. Détermination de la nature de la réactance 82

5.3. Le Pont de Sauty pour la Mesure de Capacité 84
- 5.3.1. Principe des ponts de mesure AC 84
- 5.3.2. Le pont de Sauty : structure 84
- 5.3.3. Condition d'équilibre 84
- 5.3.4. Avantages et limitations 85

5.4. L'Impédancemètre (Pont RLC) 85
- 5.4.1. Principe de l'instrument numérique 85
- 5.4.2. Paramètres mesurés et caractérisation 85
- 5.4.3. Importance de la fréquence de test 86
- 5.4.4. Modèles de mesure Série et Parallèle 86

5.5. Ressources complémentaires 87
- 5.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 87
- 5.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 88

Scenarios et Exercices 89
- Exercice 1 (À compléter) 89
- Exercice 2 (À compléter) 89
- Exercice 3 (À compléter) 89
- Exercice 4 (Raisonnement) 89
- Exercice 5 (Raisonnement) 89
- Exercice 6 (Raisonnement) 90

Chapitre 6: Mesure des Puissances et du Facteur de Puissance 94

6.1. Mesure de la Puissance Active avec un Wattmètre 94
- 6.1.1. Principe et structure du wattmètre 94
- 6.1.2. Branchement correct en monophasé 94
- 6.1.3. Lecture de l'échelle et constante de l'appareil 96

6.2. Mesure de la Puissance Réactive (Méthode des 3 Voltmètres) 98
- 6.2.1. Principe de la méthode 98
- 6.2.2. Montage et mesures 98

- 6.2.3. Analyse vectorielle (Phasor Diagram) 98
- 6.2.4. Calculs par la loi d'Al-Kashi 99

6.3. Mesure du Facteur de Puissance 99

- 6.3.1. Méthode indirecte par calcul (V-A-W) 99
- 6.3.2. Le phasemètre (Cos-phimètre) 100

6.4. Étude de Cas : Bilan de Puissance d'un Moteur 100

- 6.4.1. Objectif du laboratoire 100
- 6.4.2. Matériel et montage expérimental 100
- 6.4.3. Procédure de mesure 101
- 6.4.4. Analyse et exploitation des résultats 101

6.5. Ressources complémentaires 103

- 6.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 103
- 6.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 104

Scenarios et Exercices 105

- Exercice 1 (À compléter) 105
- Exercice 2 (À compléter) 105
- Exercice 3 (À compléter) 105
- Exercice 4 (Raisonnement) 105
- Exercice 5 (Raisonnement) 105
- Exercice 6 (Raisonnement) 106

Chapitre 7: Mesures en Triphasé Équilibré 111

7.1. Mesure des Tensions et Courants 111

- 7.1.1. Définitions fondamentales du système triphasé équilibré 111
- 7.1.2. Tensions simples et composées 111
- 7.1.3. Courants de ligne et courants de phase 112
- 7.1.4. Mesure en couplage Étoile (Y) 112
- 7.1.5. Mesure en couplage Triangle (D) 114

7.2. Mesure de la Puissance Active 114

- 7.2.1. Formules de la puissance active totale 114
- 7.2.2. Méthode d'un seul wattmètre (Système équilibré avec neutre) 114
- 7.2.3. Introduction à la méthode des deux wattmètres 115

7.3. Mesure de la Puissance Réactive 117

- 7.3.1. Formule de la puissance réactive totale 117

- 7.3.2. Méthode d'un seul wattmètre (Système équilibré) 117

7.4. Utilisation d'un Analyseur de Réseau Triphasé 119

- 7.4.1. Principe de l'instrument 119
- 7.4.2. Configuration et connexion 119
- 7.4.3. Efficacité diagnostique : obtention instantanée des grandeurs 119
- 7.4.4. Contexte : Diagnostic à la REGIDESO 120

7.5. Ressources complémentaires 122

- 7.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 122
- 7.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 123

Scenarios et Exercices 124

- Exercice 1 (À compléter) 124
- Exercice 2 (À compléter) 124
- Exercice 3 (À compléter) 124
- Exercice 4 (Raisonnement) 124
- Exercice 5 (Raisonnement) 124
- Exercice 6 (Raisonnement) 124

Chapitre 8: La Méthode des Deux Wattmètres 129

8.1. Le Montage Théorique 129

- 8.1.1. Fondement : Théorème de Blondel 129
- 8.1.2. Description du montage (3 fils) 129
- 8.1.3. Universalité du montage 130

8.2. Mesure sur Charge Déséquilibrée 130

- 8.2.1. Démonstration de la validité (Théorème de Blondel) 130
- 8.2.2. L'importance de la somme algébrique 131

8.3. Détermination de la Puissance Réactive et du Déphasage 131

- 8.3.1. Restriction : Systèmes Équilibrés Uniquement 131
- 8.3.2. Formules de calcul (pour système équilibré) 131
- 8.3.3. Calcul du déphasage $\boldsymbol{\phi}$ (pour équilibré) 132

8.4. Interprétation des Indications des Wattmètres 132

- 8.4.1. Analyse de la relation (pour charge équilibrée) 132
- 8.4.2. Cas 1 : Charge résistive ($\boldsymbol{\phi = 0\circ}$, $\boldsymbol{\cos\phi = 1}$) 133
- 8.4.3. Cas 2 : Charge inductive ($\boldsymbol{\phi = 60\circ}$, $\boldsymbol{\cos\phi = 0.5}$) 133
- 8.4.4. Cas 3 : Charge très inductive ($\boldsymbol{\phi > 60\circ}$, $\boldsymbol{\cos\phi < 0.5}$) 133

- 8.4.5. Cas 4 : Charge purement inductive ($\phi = 90 \circ$, $\cos\phi = 0$).....133
- 8.4.6. Cas 5 : Charge capacitive 134
- 8.4.7. Tableau récapitulatif du diagnostic (Charge équilibrée).....134

8.5. Ressources complémentaires 135

- 8.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 135
- 8.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 136

Scenarios et Exercices.....137

- Exercice 1 (À compléter) 137
- Exercice 2 (À compléter) 137
- Exercice 3 (À compléter) 137
- Exercice 4 (Raisonnement).....137
- Exercice 5 (Raisonnement).....137
- Exercice 6 (Raisonnement).....137

Chapitre 9: Technologie et Vérification des Compteurs d'Énergie.....141

9.1. Le Compteur d'Énergie Active Monophasé 141

- 9.1.1. Objectif et fonction de la mesure 141
- 9.1.2. Principe du compteur électromécanique (Type Ferraris) 141
- 9.1.3. Composants et création du couple moteur 141
- 9.1.4. Freinage et intégration 142
- 9.1.5. L'index et la constante du compteur 143

9.2. Le Compteur Triphasé.....143

- 9.2.1. Principe d'association 143
- 9.2.2. Le Théorème de Blondel (Rappel) 143
- 9.2.3. Compteur pour réseau 3 fils (3P3W - Type 2 éléments).....143
- 9.2.4. Compteur pour réseau 4 fils (3P4W - Type 3 éléments).....144

9.3. Le Compteur Électronique 145

- 9.3.1. Principe de la mesure statique 145
- 9.3.2. Architecture de la mesure.....145
- 9.3.3. Fonctions avancées et contexte (RDC).....146

9.4. Méthode de Vérification d'un Compteur 146

- 9.4.1. Objectif et principe.....146
- 9.4.2. Cas du compteur électromécanique (Méthode au chronomètre) 147
- 9.4.3. Procédure de vérification 147

- 9.4.4. Vérification d'un compteur électronique 148

9.5. Ressources complémentaires 149

- 9.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 149
- 9.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 151

Scenarios et Exercices 152

- Exercice 1 (À compléter) 152
- Exercice 2 (À compléter) 152
- Exercice 3 (À compléter) 152
- Exercice 4 (Raisonnement) 152
- Exercice 5 (Raisonnement) 152
- Exercice 6 (Raisonnement) 152

ANNEXES ..... a

ANNEXES ..... a

1. Schémas de Montage des Méthodes de Mesure 🔧 i

- 1.1. Méthode Voltmètre-Ampèremètre (Mesure de Z) i
- 1.2. Méthode V-A-W (Dissociation R et X) 🔬 ii
- 1.3. Pont de Sauty (Mesure de Capacité Cx) ii
- 1.4. Mesure de Puissance Active Monophasée (Wattmètre) 💡 iii
- 1.5. Méthode des 3 Voltmètres (Mesure de P et Q) 📏 iv
- 1.6. Montage des Transformateurs de Mesure (TC/TP) 🔌 iv
- 1.7. Méthode des Deux Wattmètres (Triphasé 3 Fils) v
- 1.8. Vérification de Compteur (Méthode Chronomètre) ⏱️ vi

2. Fiches de Sécurité Essentielles ⚠️ vii

- 2.1. Intervention sur Transformateur de Courant (TC) vii
- 2.2. Intervention sur Transformateur de Potentiel (TP) viii
- 2.3. Sécurité de Mesure sur Réseau (Multimètre, Oscilloscope) ix

3. Modèles de Rapports d'Essai et de Vérification ✍️ x

- 3.1. Modèle : Certificat de Vérification Périodique (Multimètre Numérique) x
- 3.2. Modèle : Rapport de Test d'un Compteur (Méthode Chronomètre) xii

4. Glossaire Technique de Métrologie Électrique 📚 xiii

- 4.1. A-C xiii
- 4.2. D-F xiv
- 4.3. H-P xiv

- 4.4. T-V xv



PRÉLIMINAIRES

1. Objectifs Généraux du Cours 🎯

L'ambition fondamentale de ce cours de troisième année est de consolider la transition de l'élève, du statut d'observateur ou d'exécutant vers celui de technicien analyste, doté d'une maîtrise opérationnelle des instruments et des méthodes de mesure électrique. L'objectif n'est pas la simple manipulation, mais la compréhension intime des principes physiques qui régissent la capture de l'information (la grandeur électrique) et des limitations inhérentes à chaque technologie d'instrumentation.

Au terme de ce module, l'apprenant doit faire preuve d'une compétence diagnostique. Il doit être capable de décomposer un problème de maintenance ou de performance sur une installation industrielle ou tertiaire en une série de questions métrologiques pertinentes. Face à un moteur asynchrone sur le site minier de Kipushi qui surchauffe, l'élève ne doit pas se contenter de mesurer un courant. Il doit être capable de sélectionner l'instrument adéquat (pince TRMS), de justifier ce choix (présence probable d'harmoniques issues d'un variateur de vitesse), de mettre en œuvre un protocole complet (mesure V-A-W triphasée, méthode des deux wattmètres), d'analyser le déséquilibre des phases, de calculer le facteur de puissance et de conclure si la surchauffe provient d'un défaut mécanique (surcharge), d'un problème d'alimentation (déséquilibre de tension du réseau SNEL) ou d'un défaut du moteur lui-même (court-circuit entre spires).

La maîtrise s'articule autour des axes suivants :

1. **Compréhension Technologique Approfondie :** L'élève doit dépasser la "boîte noire". Il doit comprendre pourquoi un appareil ferromagnétique (robuste, économique) mesure la vraie valeur efficace (I_{eff}) grâce à une déviation proportionnelle au carré du courant ($\alpha \propto I^2$), mais pourquoi son échelle quadratique le rend impropre aux lectures de précision à faible charge. Il doit comprendre pourquoi un appareil électrodynamique est le fondement du wattmètre (couple proportionnel au produit des flux des bobines fixe et mobile : $\tau_m \propto \Phi_I \cdot \Phi_V$). Cette compréhension permet de justifier le choix d'un appareil (un électrodynamique pour un étalonnage) et d'anticiper ses erreurs (l'influence de la fréquence sur un ferromagnétique).
2. **Sélection et Mise en Œuvre Sécurisée :** La sécurité est un prérequis absolu. L'objectif est d'intégrer les procédures de manière indissociable

de la mesure. L'élève doit maîtriser les catégories de sécurité (CAT III, CAT IV) et savoir qu'un multimètre CAT II est interdit sur un TGBT. Il doit connaître les risques mortels spécifiques : la surtension destructrice issue d'un secondaire de transformateur de courant (TC) laissé en circuit ouvert, et le court-circuit incendiaire provoqué par un secondaire de transformateur de potentiel (TP) mis à la masse. La mise en œuvre inclut le câblage correct et sécurisé de la méthode des deux wattmètres sur un réseau 380V sous tension, une compétence de haute technicité.

Maîtrise des Outils d'Analyse Complexes :

- **L'Oscilloscope Numérique :** L'élève doit le transformer en un outil de diagnostic avancé. L'objectif est de visualiser la *qualité* du signal, de mesurer le déphasage ϕ (via Δt ou mode XY/Lissajous) pour comprendre un facteur de puissance, et d'utiliser la fonction FFT (Transformée de Fourier Rapide) pour décomposer un signal non sinusoïdal (provenant d'un onduleur à Goma) et identifier la pollution harmonique (H3, H5, H7) responsable de l'échauffement d'un neutre.

- **L'Analyseur de Réseau :** Comprendre son rôle d'intégrateur (Voltmètre, Ampèremètre, Wattmètre, Harmoniques, Enregistreur) pour le diagnostic de longue durée, capable de capturer les micro-coupures ou les creux de tension du réseau qui échappent à une mesure instantanée.

Application aux Systèmes de Puissance (Triphasé & HT) :

- **Mesures en Triphasé :** L'objectif est la maîtrise complète du bilan de puissance triphasé. L'élève doit appliquer le théorème de Blondel (méthode des deux wattmètres), comprendre sa validité universelle pour P_T (même en déséquilibre) et ses limites (calcul de Q_T et ϕ valide *uniquement* en régime équilibré). Il doit savoir interpréter une lecture négative d'un des wattmètres comme le signe d'un facteur de puissance très faible ($\cos\phi < 0.5$).

- **Comptage d'Énergie :** L'élève doit être capable de vérifier la précision d'un compteur d'énergie. Il doit comprendre le principe du compteur Ferraris (à disque) et sa constante C (tr/kWh), et savoir appliquer la méthode "au chronomètre" (avec un wattmètre étalon) pour calculer l'erreur du compteur. Il doit aussi comprendre la supériorité (et la justification de déploiement) des

compteurs électroniques (mesure TRMS, gestion des harmoniques, multi-tarification).

- **Transformateurs de Mesure (TC/TP) :** Comprendre leur rôle vital d'interface et d'isolation entre la Moyenne/Haute Tension (ex: poste de sectionnement de la SNEL) et l'instrumentation. L'élève doit savoir choisir un TC/TP en fonction de son rapport, de sa puissance de précision (VA, "burden") et de sa classe (ex: 0.5 pour le comptage vs 5P10 pour la protection), car un mauvais choix (utiliser un TC de mesure pour un relais) peut empêcher le déclenchement lors d'un défaut et détruire une installation.

En résumé, l'objectif général est de former un technicien capable d'établir un diagnostic factuel, fiable et sécurisé sur n'importe quelle installation électrique, en justifiant sa méthode, en quantifiant ses résultats et en interprétant leur signification pour la maintenance et la qualité de l'énergie.

---

2. Approche Pédagogique Recommandée

La nature de ce cours impose une pédagogie active, centrée sur la compétence pratique et l'analyse critique. L'approche sera résolument **expérimentale et inductive**, où la théorie est introduite pour expliquer un phénomène observé au laboratoire, et non l'inverse. Les séances de travaux pratiques ne sont pas une illustration du cours, elles *sont* le cours.

1. **Pédagogie par Scénario de Diagnostic :** L'enseignant doit abandonner les exercices académiques décontextualisés (ex: "Mesurez R"). Chaque laboratoire sera introduit par un scénario de panne ou un besoin technique concret.

   - *Exemple 1 (Kinshasa) :* "Un client TGBT à Limete se plaint de déclenchements intempestifs. Le réseau est 3P+N, 380V. Le courant I_N dans le neutre, mesuré par une pince non-TRMS, semble faible. Hypothèse : pollution harmonique." L'élève doit alors proposer un protocole : utiliser une pince TRMS (qui lira $I_{TRMS} = \sqrt{I_{50Hz}^2 + I_{150Hz}^2 + \ldots}$) et un analyseur en mode FFT pour prouver que I_N est chargé en Harmonique 3. Le diagnostic n'est

pas "le disjoncteur est défectueux", mais "le neutre est surchargé par H3, provoquant un échauffement et un déclenchement".

- *Exemple 2 (Mbuji-Mayi) :* "La REGIDESO veut optimiser sa station de pompage. Le moteur principal (triphasé) semble consommer trop d'énergie réactive, pénalisant le $\cos\phi$ global." L'élève doit mettre en œuvre la méthode des deux wattmètres pour réaliser un bilan de puissance complet (P_T, Q_T, S_T), calculer le $\cos\phi$ actuel et en déduire la puissance du banc de condensateurs (Q_C) nécessaire pour ramener le $\cos\phi$ à 0.95.

2. **Prépondérance du Laboratoire (Apprentissage par l'erreur maîtrisée) :** Le volume horaire doit privilégier la manipulation (minimum 60%). L'enseignant agira en superviseur de la sécurité et en facilitateur. L'élève doit être confronté à la réalité : un montage qui ne fonctionne pas, une mesure aberrante.
   - *Situation :* L'élève mesure W_1 négatif (méthode des 2 wattmètres).
   - *Réflexe (non-formé) :* "L'appareil est cassé" ou "J'ai mal branché".
   - *Analyse (formé) :* L'élève doit consulter l'abaque de la méthode. Il doit comprendre que $W_1 < 0$ est *normal* et signifie que $\phi > 60°$ (soit $\cos\phi < 0.5$). Sa mesure n'est pas une erreur, c'est un *résultat* qui diagnostique une charge très inductive (moteur à vide, par exemple). L'erreur de câblage (court-circuiter un voltmètre, ouvrir un TC) doit être interceptée par l'enseignant, mais la *peur* de l'erreur doit être remplacée par l'analyse critique de l'incertitude.
3. **L'Exigence du Protocole et du Rapport Technique :** Une mesure non documentée est une mesure qui n'a pas eu lieu. L'enseignant doit exiger pour chaque manipulation un **rapport technique** structuré, reflétant la démarche professionnelle :
   - **Objectif :** (Ex: Vérifier la conformité du compteur SNEL S/N XXX).
   - **Schéma de Montage :** Schéma normalisé, incluant les appareils étalons.
   - **Instruments :** Tableau (Fonction, Marque, Modèle, S/N, Classe/Calibre, Date de vérification).

- **Protocole :** (Ex: Mesure P_{reelle} au wattmètre étalon, comptage $N = 10$ tours, mesure t_{mes} au chronomètre).
- **Tableau de Données Brutes :** (Les valeurs lues, sans calcul).
- **Calculs et Analyse :** (Calcul de t_{th}, calcul de l'erreur $E\%$).
- **Conclusion :** (Ex: "Le compteur S/N XXX est 'rapide' de +5.2%. Il est 'Non-Conforme' à la classe 2. Remplacement requis.").

4. **Mise en Contexte (Réalités Sociotechniques Congolaises) :** Les scénarios doivent refléter les défis locaux.
   - *Instabilité du Réseau :* L'impact des fluctuations du réseau SNEL sur la précision d'une mesure longue. Comment un creux de tension affecte-t-il la vérification d'un compteur ?
   - *Parc d'Appareils Hétérogène :* Le technicien doit savoir diagnostiquer une panne sur un vieux moteur des années 80 (GECAMINES) comme sur un onduleur neuf (Banque à Goma).
   - *Adaptation des Méthodes :* Que faire en l'absence d'un varmètre ? (Réponse : Utiliser la méthode des 3 voltmètres ou des 2 wattmètres). Que faire sans analyseur d'harmoniques ? (Réponse : Utiliser un oscilloscope en mode FFT). Le cours doit enseigner la débrouillardise métrologique rigoureuse.
5. **Focus sur l'Étalonnage et l'Incertitude :** L'école doit posséder un (ou plusieurs) appareils "Étalon" (par exemple, un multimètre de table Classe 0.1). Une séance sera dédiée à la vérification des multimètres de terrain des élèves (les "AUT") par rapport à cet étalon. L'élève doit *voir* que son multimètre (Classe 1) a une erreur, la quantifier, et comprendre le concept de "traçabilité métrologique". Il doit apprendre à douter de son instrument et à exiger sa vérification périodique.

---

3. Prérequis du Cours 📚

L'entrée dans ce module de troisième année est subordonnée à une maîtrise totale, rigoureuse et validée des compétences des deux années antérieures. Ce cours n'est pas une révision ; il constitue une application avancée de

concepts supposés acquis. Toute lacune dans ces prérequis fondamentaux se traduira par une incapacité à suivre la progression exigeante du module.

1. **Maîtrise de l'Électricité Générale (Théorie des Circuits) :**
   - **Régime Continu (DC) :** Lois de Kirchhoff (Nœuds, Mailles), Loi d'Ohm, Pont de Wheatstone. Ces concepts sont considérés comme triviaux.
   - **Régime Sinusoïdal Monophasé :** C'est le socle absolu. L'élève doit maîtriser sans aucune hésitation :
     - La représentation vectorielle (Phasors) et la notation complexe (Impédances $Z = R + jX$).
     - Le calcul d'impédance série/parallèle (Z_{eq}).
     - Le triangle des puissances : P (Active, W), Q (Réactive, VAR), S (Apparente, VA).
     - Le calcul et la signification du facteur de puissance ($\cos\phi$).
     - La résonance (série/parallèle).
   - **Régime Sinusoïdal Triphasé :** La maîtrise de ce point est critique pour les chapitres 7 et 8. Sont exigés :
     - La compréhension des tensions simples (V) et composées (U) et la relation $U = V\sqrt{3}$.
     - La maîtrise des couplages Étoile (Y) et Triangle (D).
     - Les relations Courant de Ligne / Courant de Phase pour chaque couplage ($I_L = J_{ph}$ en Y ; $I_L = J_{ph}\sqrt{3}$ en D).
     - Les formules de puissance totale ($P_T = \sqrt{3}U_L I_L \cos(\phi)$ et $Q_T = \sqrt{3}U_L I_L \sin(\phi)$) pour un système équilibré.
2. **Compétences Acquises en Mesures (2ème Année) :**
   - **Manipulation des Appareils de Base :** L'élève doit savoir brancher un Voltmètre (parallèle), un Ampèremètre (série) et un Ohmmètre (hors tension) sans erreur et en toute sécurité. Le risque de court-circuiter une source avec un ampèremètre doit être éliminé.

- **Lecture et Calibres :** Maîtrise de la lecture sur une échelle analogique (y compris l'erreur de parallaxe) et sélection du calibre optimal (immédiatement supérieur à la valeur présumée) pour minimiser l'erreur relative.
- **Notions d'Erreurs :** L'élève doit comprendre la différence entre une erreur systématique (défaut d'étalonnage) et une erreur aléatoire (lecture). Il doit savoir calculer une erreur absolue et relative.
- **Compréhension de la Classe de Précision :** L'élève doit savoir calculer l'incertitude absolue maximale garantie par la classe (ex: Classe 1.5, calibre 300A $\Longrightarrow$ incertitude de $\pm 4.5A$ sur *toute* l'échelle).

3. **Compétences Comportementales (Savoir-être Technique) :**

- **Rigueur Absolue :** Le technicien mesureur ne fait pas d'approximations. Les données sont relevées avec précision, les unités sont notées, les calculs sont vérifiés.
- **Sens Critique :** L'élève doit développer un "doute sain". Si une mesure semble aberrante (ex: un $\cos\phi > 1$ ou un courant nul), il doit d'abord vérifier son montage et son appareil avant de conclure.
- **Primauté de la Sécurité :** L'élève doit avoir intégré les réflexes de sécurité fondamentaux. La procédure de **Vérification d'Absence de Tension (VAT)** doit être automatique avant toute intervention hors tension. Le port des Équipements de Protection Individuelle (EPI) adaptés (gants isolants, visière anti-arc) lors de mesures sous tension (TBT) est non négociable. L'incapacité à respecter ces règles constitue un motif d'exclusion des séances de laboratoire.

Éditions Donel C.
Direction Éditoriale et Conception Générale :
MURHULA BAZIKANGE M.
Pour contacts, mon site web :
https://murhulabazikange.com/

© 2025, Donel Consulting, Kin. RDC
Tous droits réservés.

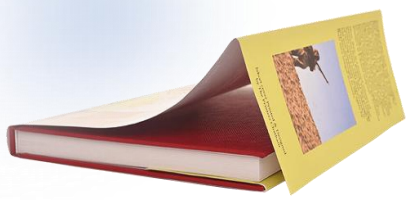
Pour l'excellence de l'éducation en RDC,
Tous les manuels scolaires en un seul endroit,
sur ce site web :
https://manuels-scolaires-rdc.com/

Pour plus de détails, scannez ceci :

PARTIE I

FONDEMENTS DE LA MÉTROLOGIE EN COURANT ALTERNATIF

Cette partie consolide les bases de la métrologie et les adapte aux spécificités du courant alternatif. Elle se concentre sur les procédures qui garantissent la fiabilité des mesures et sur la compréhension des technologies qui permettent aux instruments de mesurer des grandeurs variables dans le temps.



Chapitre 1: Principes et Technologies des Appareils AC

1.1. L'Appareil Ferromagnétique (Fer Mobile)

1.1.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de l'appareil ferromagnétique repose sur l'interaction entre un champ magnétique, généré par un courant à mesurer, et une ou plusieurs pièces de fer doux (matériau ferromagnétique). La conception la plus courante utilise le principe de la répulsion.

Le courant I à mesurer circule dans une bobine fixe. Ce courant crée un champ magnétique H proportionnel à I. Ce champ magnétise deux palettes de fer doux situées à l'intérieur de la bobine : une palette fixe et une palette mobile, cette dernière étant solidaire de l'aiguille. Les deux palettes, magnétisées par le même champ, acquièrent des polarités identiques (par exemple, deux pôles Nord face à face) et se repoussent.

La force de répulsion F est proportionnelle au produit des magnétisations, qui sont elles-mêmes proportionnelles au champ H. Par conséquent, la force F est proportionnelle à H^2, et donc proportionnelle au carré du courant I^2. $F \propto H^2 \propto I^2$

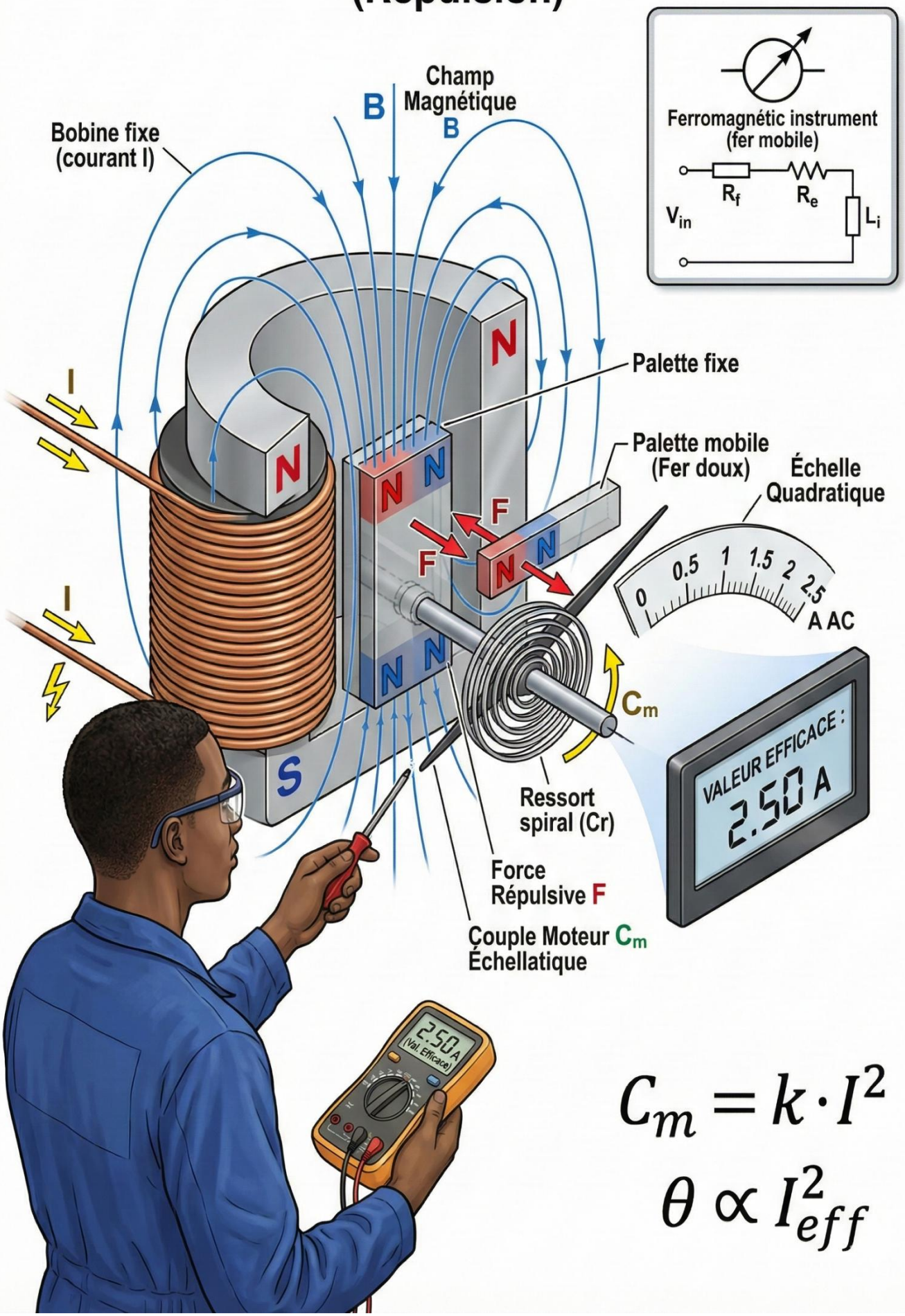
Cette force crée un couple moteur τ_m sur l'axe mobile. Un ressort spiral fournit un couple antagoniste τ_r proportionnel à l'angle de déviation α ($\tau_r = k \cdot \alpha$).

À l'équilibre, les couples se compensent : $\tau_m = \tau_r$. Comme τ_m est proportionnel à la *valeur moyenne* du carré du courant (I^2_{moyen}), on obtient : $\alpha \propto \bar{I^2}$

La valeur $\bar{I^2}$ (moyenne du carré du courant) est, par définition, le carré de la **valeur efficace** (I^2_{eff}). $\alpha \propto I^2_{eff}$

L'appareil ferromagnétique mesure donc intrinsèquement la valeur efficace du courant. En présence d'un courant alternatif sinusoïdal, le couple est pulsé (au double de la fréquence du courant) mais, en raison de l'inertie de l'équipage mobile, l'aiguille se stabilise sur une position moyenne correspondant à la valeur efficace. La graduation de l'échelle est quadratique (non linéaire), resserrée au début et plus espacée aux valeurs élevées.

Principe de l'Appareil Ferromagnétique
(Répulsion)



$$C_m = k \cdot I^2$$

$$\theta \propto I_{eff}^2$$

1.1.2. Construction et amortissement

L'appareil ferromagnétique est constitué des éléments suivants :

1. **La bobine fixe:** Elle est composée de peu de spires de gros fil pour un ampèremètre (faible résistance) et de nombreuses spires de fil fin pour un voltmètre (forte résistance, en série avec une résistance additionnelle).
2. **L'équipage mobile:** Il comprend la palette de fer mobile, l'axe de rotation monté sur des pivots ou des coussinets, l'aiguille et le système d'amortissement.
3. **La palette fixe:** Liée à la bobine.
4. **Le ressort spiral:** Génère le couple antagoniste et ramène l'aiguille à zéro.
5. **Le système d'amortissement:** Indispensable pour éviter que l'aiguille n'oscille longuement avant de se stabiliser. L'amortissement magnétique (par courants de Foucault) étant peu efficace en alternatif à basse fréquence (50 Hz), on utilise un **amortissement pneumatique** (à air), constitué d'un petit piston ou d'une palette se déplaçant dans une chambre close.

1.1.3. Avantages et inconvénients

1.1.3.1. Avantages

- **Robustesse:** La construction mécanique est simple et solide, le rendant résistant aux chocs et aux vibrations. Il supporte bien les surcharges de courte durée.
- **Coût:** Sa fabrication est relativement peu coûteuse.
- **Utilisation AC/DC:** Il fonctionne en courant continu et en courant alternatif, mesurant la valeur efficace dans les deux cas (bien que la calibration optimale soit pour l'AC).
- **Utilisation:** Il est très répandu dans les tableaux de distribution (TGBT) et les coffrets de commande pour la surveillance de charge (par exemple, sur le démarreur d'un moteur de concasseur à Lubumbashi).

1.1.3.2. Inconvénients

- **Précision moyenne:** La classe de précision est généralement de 1.5 ou 2.5 (erreur de $\pm 1.5\%$ ou $\pm 2.5\%$ de la pleine échelle).

- **Échelle non linéaire:** La graduation quadratique rend les lectures difficiles et imprécises dans le premier tiers de l'échelle.
- **Sensibilité à la fréquence:** L'impédance de la bobine ($Z = R + j\omega L$) dépend de la fréquence. L'appareil est calibré pour une fréquence nominale (par exemple, 50 Hz pour le réseau SNEL). Des variations de fréquence entraînent des erreurs de mesure.
- **Consommation propre:** La magnétisation du fer et l'impédance de la bobine impliquent une consommation d'énergie (puissance apparente) non négligeable, qui peut perturber le circuit mesuré.
- **Hystérésis et champs externes:** Le matériau ferromagnétique est sensible aux champs magnétiques externes et présente un cycle d'hystérésis, limitant la précision.

APPAREIL FERROMAGNÉTIQUE : CONSTRUCTION ET AMORTISSEMENT

