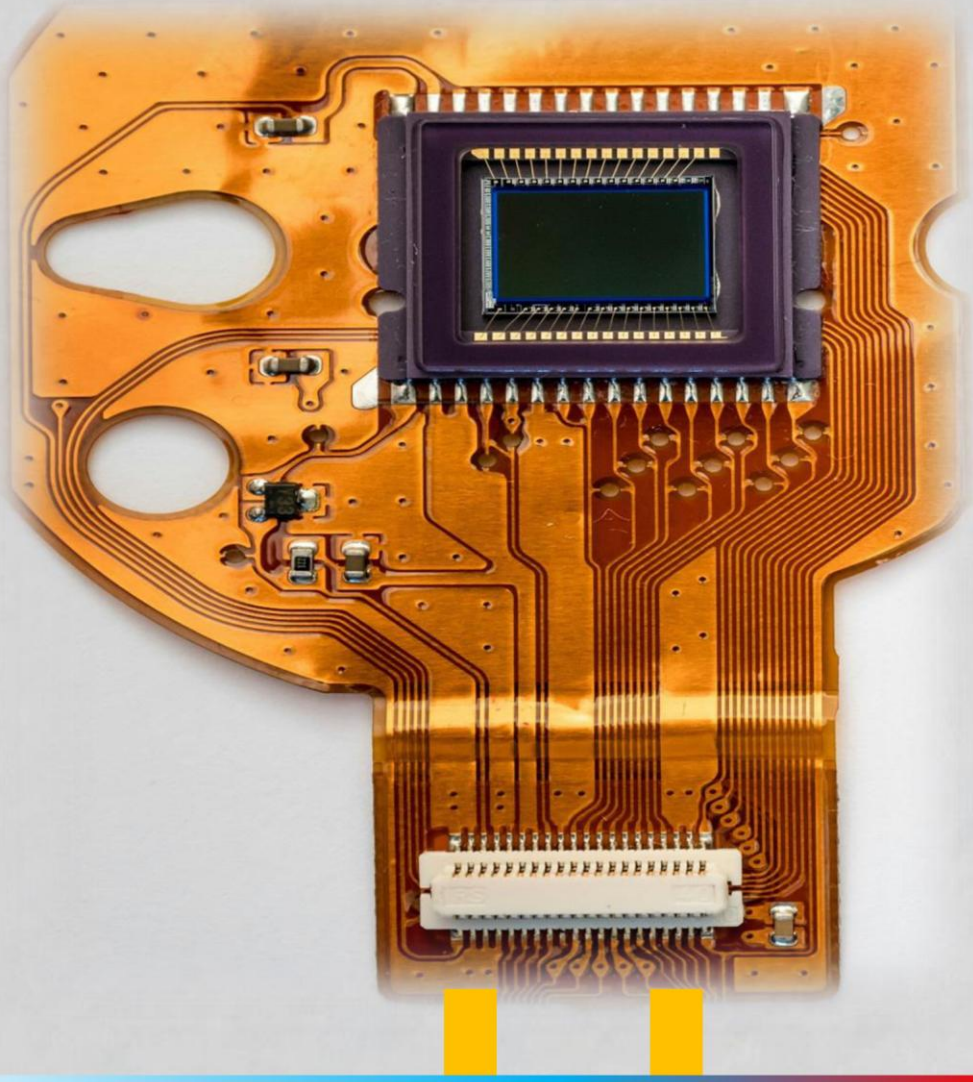


Electronique

CONFORME AU PROGRAMME NATIONAL

4ème Année

Option Electricité

EDITION 2025



TABLE DE MATIERE

PRÉLIMINAIRES 1
1. Objectifs Généraux du Cours 🎯 1
3. Prérequis du Cours 📚 7
Chapitre 1: Le Transistor à Effet de Champ (FET) 12
1.1. Le Transistor à Effet de Champ à Jonction (JFET) 12
- 1.1.1. Structure et Principe de Fonctionnement 12
- 1.1.2. Types de JFET et Symboles 13
1.2. Le Transistor à Effet de Champ à Grille Isolée (MOSFET) 14
- 1.2.1. Le MOSFET à Appauvrissement (Depletion MOSFET) 14
- 1.2.2. Le MOSFET à Enrichissement (Enhancement MOSFET) 15
1.3. Le MOSFET de Puissance 16
1.4. Le Transistor Bipolaire à Grille Isolée (IGBT) 17
Scenarios et Exercices 18
- 2.1. Exercices d'application 18
- 2.2. Scénarios d'assimilation 19
Chapitre 2: Amplificateurs de Puissance et Dissipation Thermique 23
2.1. Les Drivers et Étages Pilotes 23
- 2.1.1. Le besoin d'un étage pilote 23
- 2.1.2. Caractéristiques d'un bon driver 24
2.2. Le Rendement des Amplificateurs de Puissance 25
- 2.2.1. Classe A : La polarisation au centre 25
- 2.2.2. Classe B : Le principe du Push-Pull 26
- 2.2.3. Classe AB : Le meilleur des deux mondes 27
2.3. La Notion de Résistance Thermique et le Radiateur 27
- 2.3.1. L'analogie avec la loi d'Ohm 27
- 2.3.2. Le chemin de la chaleur 28
2.4. Dimensionnement d'un Dissipateur Thermique (Radiateur) 29
- 2.4.1. Méthodologie de calcul 29
Scenarios et Exercices 30
- 2.1. Exercices d'application 30
- 2.2. Scénarios d'assimilation 32
RESSOURCES COMPLEMENTAIRES 36
I. Questions et reponses d'approfondissement 36
II. Confusions et erreurs frequentes a eviter 41

III. La fiche de revision prete a l'emploi 44
- 3.1. Tableau Comparatif des Transistors à Effet de Champ 44
- 3.2. Amplificateurs de Puissance : Les Essentiels 45
- 3.3. Gestion Thermique : Formules et Méthodologie 46

Chapitre 3: Les Redresseurs Commandés et les Gradateurs 50
3.1. Le Thyristor (SCR) : Amorçage et Blocage 50
- 3.1.1. Structure et Symbole 50
- 3.1.2. États de Fonctionnement 50
- 3.1.3. Conditions d'Amorçage (Mise en Conduction) 51
- 3.1.4. Conditions de Blocage (Retour à l'État Bloqué) 51

3.2. Le Redresseur Monophasé Commandé 52
- 3.2.1. Structure du Pont Tout Thyristors 52
- 3.2.2. Le Contrôle par l'Angle de Retard à l'Amorçage 52
- 3.2.3. Calcul de la Tension Moyenne de Sortie 53

3.3. Le Triac et le Gradateur 54
- 3.3.1. Structure et Fonctionnement du Triac 54
- 3.3.2. Le Gradateur à Angle de Phase 54

3.4. Applications : Démarreurs Progressifs et Régulation de Chauffage 55
- 3.4.1. Démarreurs Progressifs pour Moteurs Asynchrones 55
- 3.4.2. Régulation de Puissance pour Fours Industriels 56

Scenarios et Exercices 56
- 3.1. Exercices d'application 56
- 3.2. Scénarios d'assimilation 58

Chapitre 4: Les Hacheurs (Convertisseurs DC/DC) 62
4.1. Le Hacheur Série (Abaisseur / "Buck") 62
- 4.1.1. Structure et Composants Clés 62
- 4.1.2. Principe de Fonctionnement en Régime Continu 63
- 4.1.3. Relation Entrée-Sortie 64

4.2. Le Hacheur Parallèle (Élévateur / "Boost") 64
- 4.2.1. Structure et Composants Clés 65
- 4.2.2. Principe de Fonctionnement en Régime Continu 65
- 4.2.3. Relation Entrée-Sortie 66

4.3. Les Alimentations à Découpage (SMPS) 66
4.4. Applications : Chargeurs de Batteries et Traction Électrique 67
- 4.4.1. Régulateurs de Charge pour Panneaux Solaires 68
- 4.4.2. Commande de Moteurs en Traction Électrique 68

Scenarios et Exercices 69
- 4.1. Exercices d'application 69
- 4.2. Scénarios d'assimilation 70

Chapitre 5: Les Onduleurs (Convertisseurs DC/AC) 74
5.1. Le Pont en H 74
- 5.1.1. Structure et Composants 74
- 5.1.2. Diodes de Roue Libre 74
- 5.1.3. Principe de Fonctionnement Fondamental 75

5.2. La Commande "Pleine Onde" 75
- 5.2.1. Séquence de Commande 75
- 5.2.2. Analyse et Limitations 76

5.3. La Commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI / PWM) 77
- 5.3.1. Le Principe de la MLI Sinusoïdale (SPWM) 77
- 5.3.2. Génération des Commandes 77
- 5.3.3. Analyse et Avantages 78

5.4. Applications : Variateurs de Vitesse et Onduleurs de Réseau 79
- 5.4.1. Variateurs de Vitesse pour Moteurs Asynchrones 79
- 5.4.2. Onduleurs de Réseau (Grid-Tie) 79

Scenarios et Exercices 80
- 5.1. Exercices d'application 80
- 5.2. Scénarios d'assimilation 81

RESSOURCES COMPLEMENTAIRES 85
I. Questions et reponses d'approfondissement 85
II. Confusions et erreurs frequentes a eviter 90
III. La fiche de revision prete a l'emploi 94
- 3.1. Tableau Synthétique des Convertisseurs de Puissance 94
- 3.2. Principes Fondamentaux par Famille 95
- 3.3. Formules et Concepts Clés à Maîtriser 96

Chapitre 6: Principes des Chaînes de Transmission Radio 99
6.1. La Chaîne d'Émission Radio 99
- 6.1.1. La Source Basse Fréquence (BF) 99
- 6.1.2. L'Oscillateur de la Porteuse 100
- 6.1.3. L'Étage de Modulation 100
- 6.1.4. L'Amplificateur de Puissance Radiofréquence (RF) 100
- 6.1.5. L'Antenne d'Émission 101

6.2. Le Récepteur Superhétérodyne 101

6.3. Les Blocs du Récepteur : Mélangeur, OL, Ampli FI 102
- 6.3.1. L'Oscillateur Local (OL) 102
- 6.3.2. Le Mélangeur (*Mixer*) 102
- 6.3.3. L'Amplificateur de Fréquence Intermédiaire (Ampli FI) 103

6.4. La Démodulation FM 104
- 6.4.1. Le Discriminateur à Flanc de Filtre 104
- 6.4.2. Le Discriminateur de Foster-Seeley et le Détecteur de Rapport 105
- 6.4.3. Le Démodulateur à Boucle à Verrouillage de Phase (PLL) 105

Scenarios et Exercices 105
- 6.1. Exercices d'application 105
- 6.2. Scénarios d'assimilation 107

Chapitre 7: Logique Séquentielle et Mémoires 111

7.1. Les Bascules Logiques (Flip-Flops) 111
- 7.1.1. La Bascule RS Asynchrone 111
- 7.1.2. Les Bascules Synchrones et le signal d'Horloge 112
- 7.1.3. La Bascule D (Data) 112
- 7.1.4. La Bascule JK 113

7.2. Les Registres 113
- 7.2.1. Le Registre de Mémorisation (Chargement Parallèle) 113
- 7.2.2. Les Registres à Décalage 114

7.3. Les Compteurs Asynchrones et Synchrones 114
- 7.3.1. Les Compteurs Asynchrones 115
- 7.3.2. Les Compteurs Synchrones 115

7.4. Introduction aux Mémoires 116
- 7.4.1. Organisation d'un Circuit Mémoire 116
- 7.4.2. Les Mémoires Vives (RAM) 117
- 7.4.3. Les Mémoires Mortes (ROM) 117

Scenarios et Exercices 118
- 7.1. Exercices d'application 118
- 7.2. Scénarios d'assimilation 119

RESSOURCES COMPLEMENTAIRES 123

I. Questions et reponses d'approfondissement 123

II. Confusions et erreurs frequentes a eviter 128

III. La fiche de revision prete a l'emploi 131
- 3.1. Chaîne de Transmission Radio : Blocs et Principes 131
- 3.2. Logique Séquentielle : Blocs et Principes 132

- 3.3. Mémoires à Semi-conducteurs 133

Chapitre 8: Les Capteurs et Actionneurs Industriels 136

8.1. Les Capteurs Tout-ou-Rien (TOR) 136

- 8.1.1. Détecteurs de Position Mécaniques (Fins de Course) 136
- 8.1.2. Détecteurs de Proximité Inductifs 137
- 8.1.3. Détecteurs de Proximité Capacitifs 137
- 8.1.4. Détecteurs Photoélectriques 138

8.2. Les Capteurs Analogiques 138

- 8.2.1. Capteurs de Température 138
- 8.2.2. Autres Capteurs Analogiques Courants 139
- 8.2.3. Les Standards de Signaux Analogiques (4-20 mA, 0-10 V) 139

8.3. Les Préactionneurs 140

- 8.3.1. Les Contacteurs 140
- 8.3.2. Les Distributeurs Pneumatiques et Hydrauliques 140

8.4. Les Actionneurs 140

- 8.4.1. Les Moteurs Électriques 141
- 8.4.2. Les Vérins Pneumatiques et Hydrauliques 141
- 8.4.3. Les Vannes Motorisées et Électrovannes 141

Scenarios et Exercices 142

- 8.1. Exercices d'application 142
- 8.2. Scénarios d'assimilation 143

Chapitre 9: Introduction aux Automates Programmables Industriels (API/PLC) 147

9.1. Architecture Matérielle d'un API 147

- 9.1.1. L'Alimentation 147
- 9.1.2. L'Unité Centrale (CPU - Central Processing Unit) 148
- 9.1.3. La Mémoire 148
- 9.1.4. Les Modules d'Entrées/Sorties (E/S) 148

9.2. Le Cycle de Fonctionnement de l'API 149

9.3. Le Langage de Programmation à Contacts (Ladder) 150

- 9.3.1. Structure d'un Programme Ladder 150
- 9.3.2. Symboles et Instructions de Base 150
- 9.3.3. Construction de la Logique 151

9.4. Mise en Œuvre d'un Automatisme Simple 151

- 9.4.1. Cahier des Charges 151
- 9.4.2. Affectation des Entrées/Sorties 152
- 9.4.3. Programme en Langage Ladder 152

- 9.4.4. Explication du Fonctionnement 152

Scenarios et Exercices 153

- 9.1. Exercices d'application 153
- 9.2. Scenarios d'assimilation 154

Chapitre 10: Introduction à la Régulation Industrielle 159

10.1. La Boucle de Régulation 159

- 10.1.1. Commande en Boucle Ouverte 159
- 10.1.2. Régulation en Boucle Fermée 159
- 10.1.3. Les Éléments de la Boucle 160

10.2. Le Régulateur Proportionnel (P) 160

- 10.2.1. Formulation Mathématique 161
- 10.2.2. L'Erreur Statique Résiduelle 161

10.3. Les Actions Intégrale (I) et Dérivée (D) 162

- 10.3.1. L'Action Intégrale (I) 162
- 10.3.2. L'Action Dérivée (D) 162

10.4. Le Régulateur PID 163

- 10.4.1. La Combinaison des Trois Actions 163
- 10.4.2. Le Réglage des Paramètres PID 164

Scenarios et Exercices 165

- 10.1. Exercices d'application 165
- 10.2. Scénarios d'assimilation 166

RESSOURCES COMPLEMENTAIRES 170

I. Questions et reponses d'approfondissement 170

II. Confusions et erreurs frequentes a eviter 174

III. La fiche de revision prete a l'emploi 177

- 3.1. La Chaîne d'Automatisation et de Régulation 177
- 3.2. L'Automate Programmable Industriel (API) 178
- 3.3. La Boucle de Régulation PID 179

ANNEXES ..... a

ANNEXES ..... a

A.1 Fiches de Choix pour Capteurs Industriels i

- A.1.1. Guide de Sélection d'un Détecteur de Proximité Tout-ou-Rien (TOR) i
- A.1.2. Guide de Sélection d'un Capteur de Température Analogique iii

A.2 Guides de Programmation Ladder (LD) iv

- A.2.1. Opérateurs Logiques de Base iv
- A.2.2. Mémorisation : Auto-Maintien v

- A.2.3. Blocs Fonctions : Temporisations et Compteurs v

A.3 Schémas Types de Raccordement d'API vii

- A.3.1. Raccordement d'une Entrée TOR (24V DC) vii
- A.3.2. Raccordement d'une Sortie à Relais vii
- A.3.3. Raccordement d'une Entrée Analogique 4-20 mA viii

A.4 Exemples de Boucles de Régulation ix

- A.4.1. Régulation de Température d'un Four de Pasteurisation ix
- A.4.2. Régulation de Pression d'un Réseau d'Air Comprimé x

A.5 Glossaire Complet xi

Tous les manuels scolaires en un seul endroit,
sur : www.manuels-scolaires-rdc.com



PRÉLIMINAIRES

1. Objectifs Généraux du Cours 🎯

Ce cours de terminale en Électronique représente l'aboutissement et la synthèse de votre parcours technique. Il a été méticuleusement conçu pour vous transformer d'étudiant en futur technicien supérieur, prêt à affronter les défis technologiques du monde professionnel congolais et international. L'ambition de ce programme n'est pas simplement d'ajouter de nouvelles connaissances, mais de fusionner, d'intégrer et d'appliquer l'ensemble de votre savoir acquis pour maîtriser des systèmes électroniques complexes, de leur conception à leur maintenance.

1.1. Maîtrise des Systèmes de Conversion d'Énergie Statique

L'un des piliers de l'électronique moderne est la **gestion et la conversion de l'énergie électrique**. Dans un contexte comme celui de la RDC, où la stabilité du réseau est un défi constant et où les solutions énergétiques autonomes (solaires, batteries) sont en pleine expansion, la maîtrise de l'électronique de puissance est une compétence de première nécessité. Cet objectif se décline en plusieurs sous-compétences fondamentales :

- **Analyse des Convertisseurs AC/DC (Redresseurs) :** Vous dépasserez l'étude des simples redresseurs à diodes pour analyser en profondeur les redresseurs commandés à base de thyristors et de triacs. Vous apprendrez à calculer les tensions et courants moyens, à analyser l'ondulation résiduelle et à comprendre l'impact de ces convertisseurs sur le réseau électrique (génération d'harmoniques, déphasage). L'objectif est de vous rendre capable de choisir et de maintenir le redresseur adapté à une application industrielle, comme l'alimentation d'un moteur à courant continu ou un procédé d'électrolyse.
- **Maîtrise des Convertisseurs DC/DC (Hacheurs) :** Vous explorerez l'architecture des alimentations à découpage, qui sont au cœur de tous les équipements électroniques modernes (ordinateurs, téléphones, téléviseurs). Vous étudierez les topologies fondamentales comme le hacheur dévolteur (Buck), survolteur (Boost) et le Buck-Boost. L'objectif est de vous permettre de comprendre le rôle de chaque composant (transistor de commutation, diode de roue libre, inductance de lissage, condensateur de filtrage) et de diagnostiquer une panne sur une carte d'alimentation complexe. Vous apprendrez à analyser les signaux de

commande en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI ou PWM), qui est la technique de commande universelle dans ce domaine.

- **Compréhension des Convertisseurs DC/AC (Onduleurs) :** Vous aborderez le fonctionnement des onduleurs, ces dispositifs cruciaux qui permettent de créer une tension alternative à partir d'une source continue (batterie, panneau solaire). Cet apprentissage est vital pour les systèmes d'alimentation sans interruption (ASI ou UPS), omniprésents pour protéger les équipements informatiques et médicaux, ainsi que pour les installations solaires photovoltaïques autonomes. Vous étudierez les onduleurs en pont complet (pont en H) et les stratégies de commande (commande "carrée", commande MLI sinusoïdale) pour générer une onde de sortie de qualité.

1.2. Initiation aux Systèmes Asservis et à la Régulation Industrielle

Le second pilier de ce cours est de vous introduire au monde de l'automatique et de la régulation. Un système électronique n'est souvent qu'une partie d'un ensemble plus vaste qui interagit avec le monde physique pour contrôler une grandeur (température, vitesse, position, etc.).

- **Analyse d'une Chaîne de Régulation en Boucle Fermée :** Vous apprendrez à décomposer n'importe quel système asservi en ses blocs fonctionnels standards : le **capteur** qui mesure la grandeur physique (ex: thermocouple pour la température, tachymètre pour la vitesse), le **comparateur** qui évalue l'écart entre la consigne (la valeur désirée) et la mesure, le **correcteur** (ou régulateur) qui élabore la stratégie de commande (ex: régulateur Proportionnel, Intégral, Dérivé - PID), et l'**actionneur** (ou effecteur) qui agit sur le processus physique (ex: résistance de chauffage, moteur).
- **Mise en Œuvre Pratique :** L'objectif n'est pas de faire de vous un théoricien de l'automatique, mais un technicien capable de comprendre et d'intervenir sur ces systèmes. Vous serez capable d'identifier pourquoi un four industriel n'atteint pas sa température de consigne, de vérifier si un capteur de pression fonctionne correctement, ou de comprendre le rôle des paramètres d'un régulateur PID sur la stabilité et la rapidité d'un système.

1.3. Fondements de l'Automatisme à Base d'Automates Programmables Industriels (API)

Pour achever votre formation, vous effectuerez la transition de la logique câblée (à base de relais ou de portes logiques) vers la logique programmée. L'Automate Programmable Industriel (API ou PLC en anglais) est le cerveau de la quasi-totalité des machines et des processus industriels modernes.

- **Architecture et Fonctionnement d'un API :** Vous étudierez la structure interne d'un automate : l'unité centrale (CPU), les modules d'entrées (pour recevoir les informations des capteurs, boutons, etc.), les modules de sorties (pour commander les moteurs, voyants, électrovannes, etc.) et la mémoire programme. Vous comprendrez le principe de fonctionnement cyclique de l'API (lecture des entrées, exécution du programme, mise à jour des sorties).
- **Initiation à la Programmation :** Vous serez initié au langage de programmation le plus répandu et le plus visuel pour les API : le **langage à contacts** (ou Ladder Logic - LD). Ce langage imite les schémas électriques à relais, ce qui le rend très intuitif pour un électricien ou un électronicien. Vous apprendrez à traduire un cahier des charges simple (ex: "le moteur M1 démarre si le bouton poussoir S1 est actionné ET que le capteur de sécurité S2 n'est pas actif") en un programme API fonctionnel.
- **Compétence visée :** Au terme de ce module, vous ne serez pas un expert automaticien, mais vous posséderez les bases indispensables pour dialoguer avec un automaticien, pour lire et comprendre un programme simple, et surtout pour effectuer un diagnostic de premier niveau sur une machine automatisée. Vous saurez utiliser la console de programmation pour visualiser l'état des entrées/sorties et identifier si une panne est d'origine matérielle (un capteur défaillant) ou logicielle (une condition non remplie dans le programme).

En somme, cet objectif final est de faire de vous un technicien polyvalent, capable de comprendre que les systèmes modernes sont une intégration de l'électronique de puissance (la force), de la régulation (l'intelligence de contrôle) et de l'automatisme (la logique de séquencement).

2. Approche Pédagogique Recommandée

Pour atteindre les objectifs ambitieux de cette année de terminale, l'approche pédagogique doit impérativement rompre avec une transmission purement théorique du savoir. L'électronique de puissance et l'automatisme sont des disciplines de l'action et de la mise en situation. La pédagogie sera donc active, inductive et fortement ancrée dans des problématiques concrètes, simulant autant que possible l'environnement de travail d'un technicien.

2.1. L'Étude de Cas comme Fil Conducteur

Chaque grand chapitre théorique sera introduit et rythmé par une ou plusieurs études de cas issues du monde industriel ou de problématiques technologiques pertinentes pour la RDC. Ces études de cas ne seront pas de simples illustrations, mais le moteur de l'apprentissage.

- **Exemple en Électronique de Puissance :** Au lieu de présenter le hacheur Buck de manière abstraite, le cours pourrait commencer par la problématique suivante : "Comment concevoir un chargeur de téléphone portable efficace à partir d'une batterie de voiture de 12V ?". Cette question concrète amènera naturellement à la nécessité de "hacher" la tension, de la lisser, et de la réguler. Les élèves, placés en situation de bureau d'études, découvriront la fonction et la nécessité de chaque composant à travers un besoin réel. L'étude se terminera par l'analyse du schéma d'un chargeur commercial, où ils devront identifier les blocs fonctionnels étudiés.
- **Exemple en Régulation :** La problématique pourrait être celle d'une couveuse d'œufs pour un projet avicole à la périphérie de Mbuji-Mayi. Le défi est de maintenir une température stable à 37.5°C malgré les variations de la température extérieure. Cette étude de cas permettra d'introduire de manière tangible la nécessité d'un capteur (thermistance), d'une consigne, d'un comparateur (AOP), d'un correcteur simple (tout-ou-rien) et d'un actionneur (résistance chauffante commandée par un transistor de puissance).

2.2. Le Laboratoire : Cœur de l'Apprentissage et de la Sécurité

Le passage en laboratoire sera systématique et primordial. C'est le lieu où la théorie se confronte à la réalité, où les concepts prennent forme et où les compétences pratiques se forgent. Cependant, la manipulation de

l'électronique de puissance impose un changement radical de culture de sécurité.

- **Règles de Sécurité Impératives :** Une partie significative du premier cours en laboratoire sera dédiée exclusivement aux règles de sécurité. Ces règles devront être affichées et leur respect sera non négociable.
  - **Travail Hors Tension :** Le câblage et la modification des montages se font systématiquement hors tension.
  - **Utilisation d'un Transformateur d'Isolement :** Toutes les manipulations sur des circuits liés au secteur se feront via un transformateur d'isolement pour s'affranchir de la liaison à la terre et réduire les risques d'électrocution.
  - **Points de Test et Câblage :** Les points de test seront clairement identifiés. Le câblage sera propre et organisé (fils de couleurs normalisées, sections adaptées aux courants).
  - **Équipements de Protection Individuelle (EPI) :** Le port de lunettes de sécurité sera obligatoire.
  - **La "Règle d'Une Seule Main" :** Lors de mesures sous tension, il sera conseillé de garder une main dans le dos pour éviter qu'un courant accidentel ne traverse le thorax.
  - **Habilitation et Surveillance :** Aucune manipulation ne sera autorisée sans la présence et l'accord de l'enseignant.
- **Travaux Pratiques Guidés :** Les séances de TP viseront à vérifier expérimentalement les concepts vus en cours : relever les formes d'ondes sur un hacheur, observer l'effet du rapport cyclique, tester la réponse d'un système de régulation, câbler des entrées/sorties sur un automate didactique et charger un premier programme. Ces TP développeront la maîtrise des instruments de mesure spécifiques comme l'oscilloscope à entrées différentielles ou la sonde de courant.

2.3. Le Projet de Fin d'Études : La Synthèse des Compétences

Idéalement, l'année sera jalonnée par la réalisation d'un projet de groupe. Ce projet servira d'évaluation intégrée et de démonstration des compétences acquises. L'enseignant proposera une liste de thèmes pertinents, par exemple :

- **Conception d'un petit convertisseur solaire** pour alimenter une lampe LED et un port USB.
- **Réalisation d'une régulation de niveau d'eau** pour une citerne avec commande automatique d'une pompe.
- **Programmation d'un cycle de feux de carrefour** simple sur un automate didactique.

Les élèves devront passer par toutes les étapes : recherche de solutions, conception schématique, choix des composants, réalisation pratique, tests et rédaction d'un rapport technique. Ce travail développera non seulement leurs compétences techniques mais aussi leurs "soft skills" : travail en équipe, gestion de projet, communication technique.

2.4. Ouverture sur le Monde Industriel

Pour que l'enseignement ne reste pas déconnecté des réalités du terrain, des ponts doivent être créés avec le tissu industriel local. L'organisation de visites techniques est un outil pédagogique extrêmement puissant. Une visite dans une usine de la zone industrielle de Limete à Kinshasa, dans une usine de traitement de l'eau de la REGIDESO, ou dans une grande boulangerie industrielle de Goma peut permettre aux élèves de voir en fonctionnement réel les armoires de commande à automates, les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones, et les systèmes de régulation de température des fours. Ces visites donnent du sens aux apprentissages et peuvent susciter des vocations.

3. Prérequis du Cours

L'entrée en cette année terminale d'Électronique est comparable à l'ascension du sommet d'une montagne : elle n'est possible que si les camps de base précédents ont été solidement établis. Une maîtrise parfaite, fluide et approfondie des programmes des années antérieures n'est pas une simple recommandation, c'est une condition sine qua non de réussite. Toute lacune dans les fondements se traduira inévitablement par une incapacité à suivre le rythme et à appréhender la complexité des systèmes étudiés. Les prérequis peuvent être regroupés en trois grands domaines de compétences.

3.1. Maîtrise Absolue de l'Électronique Analogique et Numérique

Le technicien supérieur doit raisonner en termes de fonctions et de blocs, mais il doit être capable, à tout moment, de "plonger" à l'intérieur de ces blocs pour en comprendre le fonctionnement au niveau du composant.

- **Transistors Bipolaires (BJT) et à Effet de Champ (FET) :** L'analyse des circuits à transistors doit être une seconde nature. Cela inclut :
  - Le calcul rigoureux du **point de polarisation** (analyse DC) de n'importe quel montage (émetteur commun, collecteur commun, base commune, polarisation par pont de résistances, etc.).
  - L'analyse en **régime dynamique** (analyse AC) à l'aide du schéma équivalent en petits signaux, pour calculer le gain en tension, le gain en courant, et les impédances d'entrée et de sortie.
  - La compréhension fine du fonctionnement du transistor en **commutation** (régimes bloqué et saturé), qui est le fondement de toute l'électronique de puissance et de la logique numérique.
- **Amplificateurs Opérationnels (AOP) :** L'AOP est la brique de base de toute la chaîne de mesure et de régulation. Une maîtrise parfaite des montages fondamentaux est exigée :
  - Montages linéaires : amplificateur inverseur, non-inverseur, suiveur, sommateur, différentiel, intégrateur et dérivateur.
  - Montages non-linéaires : comparateur simple, comparateur à hystérésis (Trigger de Schmitt).

- **Logique Combinatoire et Séquentielle :** Les bases de la logique numérique sont le prérequis à la compréhension de l'automatisme.
  - Maîtrise de l'algèbre de Boole, des tables de vérité, et de la simplification par tableaux de Karnaugh.
  - Connaissance parfaite du fonctionnement des portes logiques (ET, OU, NON, NAND, NOR, XOR) et des circuits combinatoires plus complexes (décodeurs, multiplexeurs).
  - Compréhension du principe des bascules (RS, JK, D) comme élément de mémorisation de base, et des circuits séquentiels qui en découlent (compteurs, décompteurs, registres).

3.2. Solides Compétences en Électrotechnique Fondamentale

L'électronique de puissance est le pont entre l'électronique "basse tension" et le monde de l'électrotechnique "courants forts". Il est impossible de maîtriser l'une sans des bases solides dans l'autre.

- **Régime Sinusoïdal Monophasé et Triphasé :**
  - Manipulation aisée des nombres complexes et de la représentation de Fresnel (vecteurs tournants) pour l'analyse des circuits RLC.
  - Calcul des **impédances** complexes.
  - Calcul des **puissances** : active (P, en Watts), réactive (Q, en VAR) et apparente (S, en VA), ainsi que du **facteur de puissance**. Cette notion est capitale pour comprendre la performance des installations électriques industrielles.
  - Connaissance des systèmes triphasés, des couplages étoile et triangle, et des tensions simples et composées.
- **Principes des Machines Électriques et Transformateurs :**
  - Compréhension du principe de fonctionnement, du schéma équivalent et du bilan de puissance d'un **transformateur** monophasé, qui est omniprésent dans les circuits d'alimentation et d'isolement.
  - Connaissance des principes de base des **moteurs à courant continu** (dont la vitesse est liée à la tension d'alimentation) et des

moteurs asynchrones triphasés (le moteur industriel par excellence).

3.3. Compétences Transversales Indispensables

Au-delà des connaissances techniques pures, la réussite dans cette dernière année et dans la future vie professionnelle dépend de compétences méthodologiques et intellectuelles robustes.

- **Lecture et Interprétation de Schémas Complexes :** L'élève doit être capable de lire un schéma électronique de plusieurs pages, d'en comprendre l'organisation structurelle, de suivre le chemin d'un signal à travers différents étages, et d'identifier les blocs fonctionnels (alimentation, amplification, commande, etc.).
- **Méthodologie de Dépannage :** Il doit avoir acquis une méthode de diagnostic logique, basée sur le raisonnement par élimination, la mesure et l'interprétation. Il doit savoir formuler des hypothèses ("si la tension en ce point est nulle, alors le problème se situe en amont ou ce composant est en court-circuit") et les vérifier par des mesures appropriées.
- **Rigueur Mathématique et Logique :** La capacité à poser correctement un problème, à le modéliser par des équations, à effectuer les calculs sans erreur et à critiquer la validité du résultat est fondamentale. L'électronique de puissance et la régulation sont des disciplines qui ne tolèrent pas l'approximation.

En conclusion, cette année de terminale est un programme exigeant qui s'adresse à des élèves déjà compétents et motivés. Le succès réside dans leur capacité à mobiliser activement et intelligemment l'ensemble de leur bagage technique pour résoudre des problèmes de niveau supérieur, marquant ainsi leur transition finale vers le monde professionnel.

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.

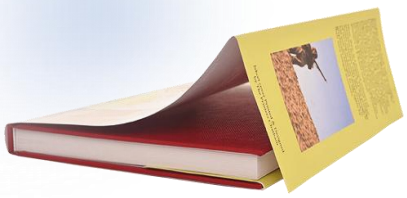
Pour l'excellence de l'éducation en RDC,
Tous les manuels scolaires en un seul endroit,
sur ce site web :
https://manuels-scolaires-rdc.com/

Pour plus de détails, scannez ceci :

PARTIE 1 :

COMPOSANTS ACTIFS MODERNES ET AMPLIFICATION SPÉCIALISÉE

Cette partie approfondit l'étude des composants à semi-conducteurs en introduisant les transistors à effet de champ, qui sont dominants dans de nombreuses applications, et en abordant les aspects pratiques des amplificateurs de puissance. Elle explore également les applications non linéaires de l'amplificateur opérationnel, ouvrant la porte aux circuits de commande et de comparaison.



Chapitre 1: Le Transistor à Effet de Champ (FET)

1.1. Le Transistor à Effet de Champ à Jonction (JFET)

Le Transistor à Effet de Champ à Jonction, ou **JFET** (de l'anglais *Junction Field-Effect Transistor*), est un composant semi-conducteur fondamental qui utilise un champ électrique pour contrôler la conductivité d'un "canal" à travers lequel circule le courant. Sa particularité réside dans sa commande : contrairement au transistor bipolaire (BJT) qui est commandé par un courant de base, le JFET est **commandé par une tension** appliquée à sa grille. Cette caractéristique lui confère une impédance d'entrée extrêmement élevée, ce qui constitue son avantage majeur dans de nombreuses applications. 💡

1.1.1. Structure et Principe de Fonctionnement

La structure d'un JFET est constituée d'une barre de matériau semi-conducteur, soit de type N, soit de type P. Cette barre forme le **canal** de conduction. Les deux extrémités de ce canal sont appelées la **Source (S)** et le **Drain (D)**. Le courant principal, noté I_D, circule du drain vers la source (pour un canal N) ou de la source vers le drain (pour un canal P).

Implantée de part et d'autre de ce canal se trouve une région de dopage opposé, appelée la **Grille (G)**. La jonction PN ainsi formée entre la grille et le canal est la clé du fonctionnement du JFET. En fonctionnement normal, cette jonction est toujours **polarisée en inverse**.

Le principe est le suivant :

1. **Absence de tension de grille ($V_{GS} = 0V$)** : Lorsqu'une tension V_{DS} est appliquée entre le drain et la source, les électrons (pour un canal N) circulent librement dans le canal, créant un courant de drain I_D. La largeur du canal est maximale, et le courant atteint sa valeur la plus élevée, appelée courant de drain à source court-circuitée, noté I_{DSS}.
2. **Application d'une tension de grille inverse ($V_{GS} < 0V$ pour un canal N)** : La polarisation inverse de la jonction Grille-Canal crée une **zone de déplétion** (une région vide de porteurs de charge libres) qui s'étend dans le canal. Cette zone de déplétion est isolante et réduit la section utile du canal pour le passage du courant.

3. **Modulation du courant** : Plus la tension inverse V_{GS} est élevée (c'est-à-dire plus elle est négative pour un canal N), plus la zone de déplétion s'élargit, "étranglant" ou "pinçant" le canal. Cet étranglement réduit le courant de drain I_D. Le champ électrique créé par la tension de grille contrôle donc le flux de courant, d'où le nom de "transistor à effet de champ".

4. **Tension de Pincement (V_P)** : Il existe une valeur de tension V_{GS}, appelée **tension de pincement** (en anglais *pinch-off voltage*), notée V_P, pour laquelle la zone de déplétion s'étend sur toute la largeur du canal. À cette tension, le canal est théoriquement complètement bloqué et le courant de drain I_D devient nul.

La relation mathématique qui lie le courant de drain I_D à la tension grille-source V_{GS} dans la zone de saturation est décrite par l'équation de Shockley.

- $I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$
- Ici, I_{DSS} représente le courant de saturation maximal, obtenu lorsque la tension V_{GS} est nulle.
- V_P représente la tension de pincement, qui est la valeur de V_{GS} nécessaire pour annuler le courant I_D. C'est une valeur négative pour un JFET à canal N et positive pour un JFET à canal P.

L'impédance d'entrée du JFET est exceptionnellement élevée, de l'ordre de plusieurs centaines de mégaohms ($M\Omega$), car la jonction grille-canal est polarisée en inverse. Le courant de grille I_G est donc extrêmement faible (quelques nanoampères), souvent considéré comme nul dans les calculs pratiques.

1.1.2. Types de JFET et Symboles

Il existe deux types de JFET, classés selon le type de dopage du canal :

1. **JFET à Canal N** : Le canal est fait d'un semi-conducteur de type N (les porteurs majoritaires sont des électrons). La grille est de type P. Il est commandé par une tension V_{GS} négative.

2. **JFET à Canal P** : Le canal est fait d'un semi-conducteur de type P (les porteurs majoritaires sont des trous). La grille est de type N. Il est commandé par une tension V_{GS} positive.

Les symboles schématiques permettent de les différencier. La flèche sur la grille indique le sens de la jonction PN, pointant vers l'intérieur pour un canal N et vers l'extérieur pour un canal P.

1.2. Le Transistor à Effet de Champ à Grille Isolée (MOSFET)

Le **MOSFET** (de l'anglais *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) est sans conteste le transistor le plus important et le plus utilisé dans l'électronique moderne. On le retrouve dans la quasi-totalité des circuits intégrés, des microprocesseurs de nos ordinateurs et téléphones aux mémoires et aux circuits logiques. 💻📱

Sa structure diffère de celle du JFET par un détail crucial : la grille métallique n'est pas en contact direct avec le canal semi-conducteur. Elle en est séparée par une très fine couche d'isolant, généralement du **dioxyde de silicium (**SiO_2**)**. Cette isolation électrique confère au MOSFET une impédance d'entrée encore plus prodigieuse que celle du JFET, atteignant des valeurs de l'ordre du téraohm ($10^{12}\Omega$). En pratique, le courant de grille est absolument négligeable.

1.2.1. Le MOSFET à Appauvrissement (Depletion MOSFET)

Le MOSFET à appauvrissement, ou D-MOSFET, possède une structure où un **canal physique est déjà présent** entre le drain et la source, même en l'absence de tension de grille. Son fonctionnement peut s'opérer de deux manières :

1. **Mode d'appauvrissement (Depletion Mode)** : C'est le mode de fonctionnement principal. Pour un MOSFET à canal N, si on applique une tension négative sur la grille ($V_{GS} < 0V$), le champ électrique créé repousse les électrons porteurs de charge hors du canal. Cela a pour effet de réduire la largeur effective du canal, augmentant sa résistance et diminuant le courant de drain I_D. Ce comportement est très similaire à celui d'un JFET. Si la tension négative est suffisamment grande, on atteint la tension de pincement V_P et le courant s'annule.
2. **Mode d'enrichissement (Enhancement Mode)** : Contrairement au JFET, il est possible d'appliquer une tension positive sur la grille d'un D-MOSFET à canal N ($V_{GS} > 0V$). Dans ce cas, le champ électrique attire des porteurs de charge minoritaires du substrat vers la région du canal. Ces

électrons supplémentaires viennent "enrichir" le canal, augmentant sa conductivité et permettant à un courant I_D supérieur à I_{DSS} de circuler.

Un D-MOSFET peut donc fonctionner avec des tensions de grille de polarités opposées, ce qui le rend polyvalent.

1.2.2. Le MOSFET à Enrichissement (Enhancement MOSFET)

Le MOSFET à enrichissement, ou E-MOSFET, est la variété la plus courante. Sa structure est conçue de telle sorte qu'il n'existe **aucun canal physique** entre le drain et la source lorsque la tension de grille est nulle ($V_{GS} = 0V$). Le transistor est alors naturellement **bloqué** (OFF).

Pour le rendre conducteur, il faut appliquer une tension sur la grille de même polarité que le canal à créer. Pour un E-MOSFET à canal N, on applique une tension positive $V_{GS} > 0V$. Cette tension positive crée un champ électrique à travers la couche de SiO_2 qui attire les électrons (porteurs minoritaires) du substrat de type P et les accumule juste sous la grille.

Lorsque la tension V_{GS} atteint une valeur critique appelée **tension de seuil** (en anglais *threshold voltage*), notée V_{th}, le nombre d'électrons accumulés est suffisant pour former une couche d'inversion qui se comporte comme un canal de type N. Un chemin conducteur est alors "créé" ou "induit" entre le drain et la source, et le courant I_D peut circuler.

- Pour $V_{GS} < V_{th}$, le transistor est bloqué, $I_D \approx 0$.
- Pour $V_{GS} > V_{th}$, le transistor est conducteur, $I_D > 0$.

Plus la tension V_{GS} augmente au-delà de V_{th}, plus le canal induit devient large et conducteur, et plus le courant de drain I_D augmente. Cette propriété fait du E-MOSFET un excellent **interrupteur commandé par tension**, ce qui explique sa domination totale dans le domaine de l'électronique numérique et des microprocesseurs, où des milliards de ces transistors commutent entre les états ON et OFF pour effectuer des calculs.

1.3. Le MOSFET de Puissance

Les MOSFET décrits précédemment, dits "de petit signal", sont conçus pour manipuler de faibles courants et tensions. Pour les applications de puissance, comme la commande de moteurs ou les alimentations, des structures spéciales ont été développées : les **MOSFET de Puissance**.

La différence majeure réside dans leur géométrie. Au lieu d'un flux de courant horizontal le long de la puce de silicium, les MOSFET de puissance utilisent une structure verticale. Le courant entre par le drain sur la face supérieure de la puce et sort par la source sur la face inférieure. Cette architecture est souvent appelée **VMOS** (Vertical MOS) ou DMOS (Diffused MOS).

Cette conception verticale offre plusieurs avantages décisifs :

- **Gestion de courants élevés** : La structure permet de mettre en parallèle des milliers de petites cellules MOSFET sur une même puce, offrant une très grande surface pour le passage du courant. Cela permet de commuter des courants de plusieurs dizaines, voire centaines d'ampères.
- **Tenue en tension élevée** : La géométrie verticale permet d'intégrer des régions spécifiques conçues pour supporter des tensions très élevées entre le drain et la source, pouvant atteindre plusieurs centaines ou milliers de volts.
- **Faible résistance à l'état passant ($R_{DS(on)}$)** : C'est un paramètre crucial. La résistance du transistor lorsqu'il est complètement conducteur doit être la plus faible possible (quelques milliohms) pour minimiser les pertes de puissance par effet Joule ($P = R_{DS(on)} \cdot I_D^2$). Des pertes faibles signifient moins de chaleur à dissiper, ce qui est essentiel en électronique de puissance.
- **Vitesse de commutation rapide** : Les MOSFET de puissance peuvent commuter (passer de l'état bloqué à l'état passant et vice-versa) très rapidement, à des fréquences de plusieurs centaines de kilohertz. Cette capacité est au cœur du fonctionnement des alimentations à découpage modernes, qui sont bien plus efficaces et compactes que les anciennes alimentations linéaires.

On les trouve dans les onduleurs solaires, les variateurs de vitesse pour moteurs industriels, les chargeurs de batteries, les ballasts électroniques pour l'éclairage et dans toute l'électronique de puissance automobile.