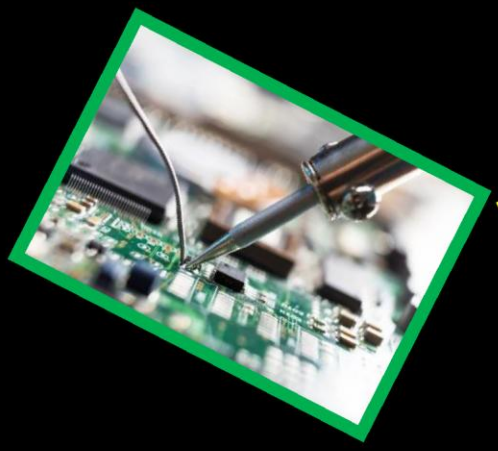
Electronique

CONFORME
AU PROGRAMME
NATIONAL

3ème Année

Option
Electricité

EDITION
2025



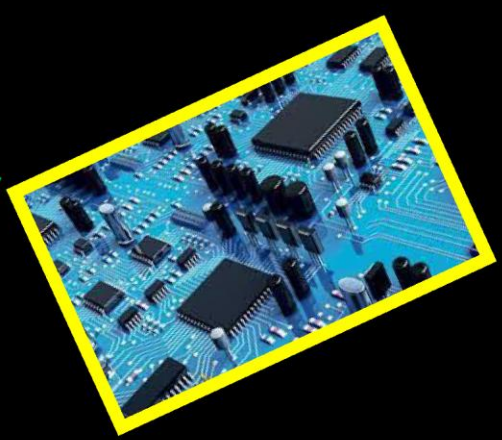




TABLE DE MATIERE

PRÉLIMINAIRES 1
1. Objectifs Généraux du Cours 🎯 1
- 1.1. Introduction à la Science de l'Électron 1
- 1.2. De l'Héritage Historique à la Modernité 1
- 1.3. Compétences Analytiques et Pratiques 1

2. Approche Pédagogique Recommandée 2
- 2.1. L'Alliance Théorie-Pratique 2
- 2.2. Progression Didactique Comparative 2
- 2.3. Outils et Méthodes de Laboratoire 3
- 2.4. Ancrage Contextuel RDC CD 3

3. Prérequis du Cours 3
- 3.1. Maîtrise de l'Électricité Générale 3
- 3.2. Aisance en Courant Alternatif ~ 4
- 3.3. Compétences Transversales 4

4. Sécurité et Normes en Laboratoire 4
- 4.1. Les Dangers de l'Électricité 4
- 4.2. Protection du Matériel et des Composants 5
- 4.3. Normes et Standards 5

Chapitre 1 : Émission Électronique et Diodes à Vide 8
1.1. Les Différents Types d'Émission Électronique 8
1.2. Technologie des Cathodes Chauffées 8
1.3. La Diode à Vide : Constitution et Fonctionnement 10
1.4. Caractéristique et Applications de la Diode à Vide 10
1.5. Ressources complémentaires 11
- 1.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 11
- 1.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 11

1.6. Scenarios et Exercices 12

- 1.6.1. Scenarios d'assimilation 12
- 1.6.2. Exercices.....14

Chapitre 2 : La Jonction P-N et la Diode à Semi-conducteur 18

2.1. Le Principe de la Jonction P-N 18

2.2. Polarisation de la Diode et Effet Redresseur 18

2.3. Caractéristique et Modèles de la Diode Réelle.....20

2.4. Diodes Spéciales : Zener et LED 20

2.5. Ressources complémentaires.....21

- 2.5.1. Questions et réponses d'approfondissement.....21
- 2.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 21

2.6. Scenarios et Exercices.....22

- 2.6.1. Scenarios d'assimilation 22
- 2.6.2. Exercices.....24

Chapitre 3 : Circuits de Redressement et de Filtrage.....27

3.1. Le Redressement Simple Alternance 27

3.2. Le Redressement Double Alternance.....27

3.3. Le Filtrage par Condensateur.....29

3.4. Le Doubleur de Tension de Latour 29

3.5. Ressources complémentaires.....29

- 3.5.1. Questions et réponses d'approfondissement.....29
- 3.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 30

3.6. Scenarios et Exercices.....31

- 3.6.1. Scenarios d'assimilation 31
- 3.6.2. Exercices.....33

Chapitre 4 : Le Tube Triode et ses Caractéristiques 39

4.1. Constitution et Rôle de la Grille de Commande 39

4.2. Les Réseaux de Caractéristiques.....39

4.3. Coefficients Dynamiques et Droite de Charge 41

4.4. Le Principe de l'Amplification par Tube.....41

4.5. Ressources complémentaires....42
- 4.5.1. Questions et réponses d'approfondissement....42
- 4.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter....42
- 4.5.3. Scenarios et Exercices....43

Chapitre 5 : Le Transistor Bipolaire (BJT)....48
5.1. Constitution et Principe de Fonctionnement....48
5.2. Caractéristiques et Régimes de Fonctionnement....48
5.3. La Polarisation du Transistor....50
5.4. Le Transistor en Amplificateur (Schéma Émetteur Commun)....50
5.5. Ressources complémentaires....51
- 5.5.1. Questions et réponses d'approfondissement....51
- 5.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter....51
- 5.5.3. Scenarios et Exercices....52

Chapitre 6 : Les Classes d'Amplification....57
6.1. Définition des Classes d'Amplification....57
6.2. L'Amplificateur de Classe A....57
6.3. L'Amplificateur de Classe B et le Montage « Push-Pull »....59
6.4. L'Amplificateur de Classe AB....59
6.5. Ressources complémentaires....59
- 6.5.1. Questions et réponses d'approfondissement....59
- 6.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter....60
- 6.5.3. Scenarios et Exercices....60

Chapitre 7 : Principes des Oscillations Électriques....67
7.1. Le Circuit Oscillant LC (Circuit « Bouchon »)....67
7.2. Les Oscillations Amorties....67
7.3. La Condition d'Entretien des Oscillations....69
7.4. Stabilité en Fréquence et en Amplitude....69
7.5. Ressources complémentaires....70
- 7.5.1. Questions et réponses d'approfondissement....70

- 7.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 70

7.6. Scenarios et Exercices.....71

- 7.6.1. Scenarios d'assimilation 71
- 7.6.2. Exercices.....73

Chapitre 8 : Les Oscillateurs Sinusoïdaux 76

8.1. L'Oscillateur à Réaction de Hartley.....76

8.2. L'Oscillateur à Réaction de Colpitts 76

8.3. L'Oscillateur à Déphasage RC 78

8.4. L'Oscillateur à Quartz.....78

8.5. Ressources complémentaires.....79

- 8.5.1. Questions et réponses d'approfondissement.....79
- 8.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 79
- 8.5.3. Scenarios et Exercices.....80

Chapitre 9 : Modulation et Démodulation d'Amplitude (AM).....86

9.1. Le Principe de la Modulation.....86

9.2. Le Circuit de Modulation d'Amplitude 86

9.3. Le Principe de la Démodulation (Détection) 88

9.4. La Chaîne Complète d'un Récepteur AM 88

9.5. Ressources complémentaires.....89

- 9.5.1. Questions et réponses d'approfondissement.....89
- 9.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 89
- 9.5.3. Scenarios et Exercices.....90

Chapitre 10 : Introduction à l'Électronique Numérique 95

10.1. Logique Binaire et Niveaux Logiques 95

10.2. Ressources complémentaires.....95

- 10.2.1. Questions et réponses d'approfondissement.....95
- 10.2.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 96
- 10.2.3. Scenarios et Exercices.....98

10.2. Les Portes Logiques de Base : NON, ET, OU 102

10.3. Réalisation des Portes Logiques à l'aide de Transistors 102
10.4. Algèbre de Boole et Simplification de Circuits 103
10.5. Ressources complémentaires 103
- 10.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 103
- 10.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 104
- 10.5.3. Scenarios et Exercices 104

ANNEXES ..... a
ANNEXES ..... a
A.1. Fiches de Synthèse et Comparatifs Techniques 📊 i
- A.1.1. Comparatif Tube à Vide vs Transistor Bipolaire vs Transistor à Effet de Champ i
- A.1.2. Classification des Amplificateurs par Classe de Fonctionnement ii

A.2. Formulaire Technique pour le Calcul des Circuits 🧮 iii
- A.2.1. Loi d'Ohm et Puissance (Rappel Fondamental) iii
- A.2.2. Diodes et Redressement ⚡ iv
- A.2.3. Transistor Bipolaire (Émetteur Commun) 🐜 iv
- A.2.4. Oscillateurs (Fréquences de Résonance) 〰 iv
- A.2.5. Décibels et Unités Logarithmiques 📈 v

A.3. Bibliothèque des Symboles Normalisés (CEI) 📐 v
- A.3.1. Composants Passifs v
- A.3.2. Composants Actifs et Semi-conducteurs vi
- A.3.3. Tubes à Vide vi
- A.3.4. Logique Numérique vi

A.4. Tables de Vérité des Fonctions Logiques 🚦 vii
- A.4.1. Fonctions de Base (2 entrées A, B) vii
- A.4.2. Fonction Inverseur (NOT) (1 entrée A) vii
- A.4.3. Propriétés Algébriques Utiles (Boole) vii

A.5. Glossaire Technique et Lexique Anglais-Français 📖 viii

- A - B viii
- C - D ix
- E - F ix
- G - H x
- I - L x
- M - O x
- P - R xi
- S - T xi
- U - Z xii

A.6. Guide de Dépannage Rapide (Troubleshooting) 🛠️🚑 xii



PRÉLIMINAIRES

1. Objectifs Généraux du Cours 🎯

1.1. Introduction à la Science de l'Électron ⚡

Ce cours a pour objectif primordial d'introduire l'élève aux principes fondamentaux de l'électronique, définie ici comme la science qui permet de traiter l'information et de moduler l'énergie en contrôlant avec précision le mouvement des électrons dans la matière ou le vide. Contrairement à l'électricité générale qui s'intéresse principalement au transport de l'énergie brute, l'électronique se focalise sur le signal, porteur d'information (voix, image, données). L'ambition est de construire une compréhension solide et opérationnelle des quatre fonctions électroniques piliers : redresser (convertir l'alternatif en continu), amplifier (augmenter la puissance d'un signal), osciller (générer une fréquence) et commuter (traiter des états logiques). Cette maîtrise permettra à l'élève de ne plus voir un appareil électronique comme une "boîte noire", mais comme un assemblage logique de sous-systèmes fonctionnels interconnectés.

1.2. De l'Héritage Historique à la Modernité



L'élève étudiera les composants historiques, tels que les tubes à vide (diodes, triodes), non par nostalgie, mais pour en saisir les principes physiques épurés (émission thermoïonique, charge d'espace) qui restent la clé de compréhension des phénomènes de haute puissance et haute fréquence. Cette base servira de tremplin pour maîtriser leurs équivalents modernes à semi-conducteurs (diodes à jonction, transistors bipolaires), qui constituent l'architecture de toute la technologie contemporaine, du simple poste radio aux processeurs de smartphones. L'objectif est de rendre l'élève capable de tracer le parallèle technologique : comprendre que la grille d'une triode et la base d'un transistor remplissent la même fonction de contrôle, bien que les mécanismes physiques sous-jacents diffèrent.

1.3. Compétences Analytiques et Pratiques 🛠

Au terme de ce module, l'apprenant ne doit pas seulement "savoir", il doit "savoir-faire". Il doit être capable d'analyser un circuit simple en identifiant ses blocs fonctionnels (ici l'alimentation, là le préamplificateur, ici l'étage de puissance). Il devra savoir calculer les grandeurs électriques essentielles

(points de repos, gains, puissances dissipées) pour valider la viabilité théorique d'un montage. Plus concrètement, il devra être capable de mettre en œuvre les composants de base pour répondre à un cahier des charges simple : concevoir une alimentation stabilisée 12V, réparer un étage amplificateur audio défaillant, ou réaliser un petit clignotant à transistor. L'objectif ultime est de former un technicien autonome, capable de diagnostiquer, de réparer et de concevoir des solutions adaptées aux réalités du terrain en RDC.

2. Approche Pédagogique Recommandée



2.1. L'Alliance Théorie-Pratique

La pédagogie de ce cours doit impérativement lier la théorie à une pratique intensive en laboratoire. L'électronique ne s'apprend pas uniquement au tableau noir ; elle se vit "les mains dans le cambouis". Chaque concept théorique, aussi abstrait soit-il (comme la barrière de potentiel d'une jonction PN), doit être immédiatement suivi d'une manipulation concrète qui le rend tangible. Par exemple, après avoir étudié la courbe caractéristique de la diode, l'élève doit la tracer lui-même point par point en laboratoire, constatant de visu le seuil de conduction et l'effet de la température. Cette approche inductive, partant de l'observation pour aller vers la loi générale, favorise une rétention durable des connaissances et développe l'intuition technique, qualité première du bon dépanneur.

2.2. Progression Didactique Comparative

Chaque fonction électronique majeure (ex: amplification) sera étudiée selon une approche comparative rigoureuse. Nous commencerons par son implémentation historique (le tube triode) pour sa simplicité conceptuelle et sa visualité pédagogique, puis nous transposerons immédiatement ces acquis vers la technologie moderne (le transistor). Cette méthode permet de démystifier le transistor, souvent perçu comme complexe par les débutants, en le présentant comme une évolution logique du tube. En comparant systématiquement leurs caractéristiques (impédance d'entrée, linéarité, tension de service) et leurs performances, l'élève apprendra à choisir le bon composant pour la bonne application. Il comprendra pourquoi le tube survit dans les émetteurs radio de forte puissance à Kinshasa, tandis que le transistor règne en maître dans l'informatique et l'audio portable.

2.3. Outils et Méthodes de Laboratoire

L'utilisation systématique de plaquettes de montage sans soudure (« breadboards ») est centrale dans cette approche. Elles permettent un prototypage rapide, autorisant l'erreur et la correction immédiate sans dégrader les composants. L'élève doit développer une dextérité dans le câblage, apprenant à organiser ses circuits proprement pour en faciliter la lecture et le dépannage. L'oscilloscope et le multimètre ne doivent pas être des objets de musée sortis une fois par an, mais les outils permanents d'investigation, présents sur la paillasse à chaque séance. L'élève doit apprendre à "voir" l'électricité : visualiser la forme d'onde redressée, mesurer l'ondulation résiduelle, observer la distorsion d'un amplificateur saturé. Cette familiarité avec l'instrumentation de mesure est le socle de la compétence professionnelle.

2.4. Ancrage Contextuel RDC CD

L'enseignant s'appuiera sur des systèmes concrets et locaux pour illustrer les concepts. Plutôt que d'étudier des circuits abstraits, nous analyserons l'étage d'amplification d'une petite radio assemblée localement ou réparée dans les ateliers de la Cité. Nous aborderons la conception d'une alimentation de secours pour un chargeur de téléphone ou un modem Wi-Fi, répondant ainsi au défi omniprésent de la stabilité énergétique à travers tout le Congo. Les exercices prendront en compte les contraintes réelles : variations de tension du réseau SNEL, chaleur humide tropicale affectant les composants, disponibilité des pièces de rechange sur les marchés locaux. Cet ancrage contextuel donne du sens à l'apprentissage et prépare l'élève à devenir un acteur utile de son environnement économique immédiat.

3. Prérequis du Cours

3.1. Maîtrise de l'Électricité Générale

Une maîtrise complète et sans faille du programme d'Électricité Générale des deux années précédentes est le fondement indispensable sur lequel se construit ce cours. L'électronique n'est qu'une application raffinée de l'électricité. L'élève doit dominer parfaitement les lois fondamentales (Loi d'Ohm $U = RI$, Lois de Kirchhoff des mailles et des nœuds) et l'analyse des circuits en courant continu (DC). Il doit savoir simplifier un circuit complexe en utilisant les théorèmes de Thévenin et de Norton, compétences cruciales pour modéliser les étages d'entrée et de sortie des amplificateurs. Sans cette

aisance à calculer des courants et des tensions dans des réseaux résistifs, l'étude de la polarisation des transistors sera insurmontable.

3.2. Aisance en Courant Alternatif ~

Les notions de base du courant alternatif (AC) sont tout aussi critiques. L'élève doit avoir une compréhension intuitive et mathématique des concepts de fréquence (f), de période (T), d'amplitude, de valeur efficace (RMS) et de déphasage. Il doit comprendre le comportement des composants passifs (condensateur, bobine) en régime fréquentiel : savoir qu'un condensateur bloque le continu mais laisse passer l'alternatif (impédance $1/C\omega$), et inversement pour la bobine. Ces notions sont pré-requises pour aborder le filtrage des alimentations, le couplage entre étages amplificateurs et le fonctionnement des circuits oscillants. Une lacune ici rendrait incompréhensible le chapitre sur le filtrage ou l'amplification audio.

3.3. Compétences Transversales 📐

Au-delà de l'électricité pure, des compétences transversales sont requises. La lecture fluide de schémas électriques normalisés est impérative : l'élève doit reconnaître instantanément les symboles graphiques et comprendre la topologie d'un circuit sans hésitation. Une aisance en calcul algébrique est également requise pour manipuler les formules, résoudre des systèmes d'équations linéaires lors de l'analyse des mailles, et manipuler les puissances de 10 (notations scientifiques pour les microfarads, mégahertz, etc.). Enfin, une certaine rigueur logique et méthodologique est attendue pour mener à bien les diagnostics de panne : savoir poser des hypothèses, effectuer des mesures pour les valider ou les réfuter, et conclure avec précision.

4. Sécurité et Normes en Laboratoire ⚠️

4.1. Les Dangers de l'Électricité ⚡💀

Avant même de toucher au premier composant, l'élève doit être imprégné d'une culture de sécurité absolue. L'électronique manipule parfois des tensions mortelles, notamment dans l'étude des tubes à vide où les tensions d'anode dépassent souvent les 300 Volts, ou lors du travail sur le secteur 220V pour les alimentations. L'élève doit connaître les effets physiologiques du courant électrique (tétanisation, fibrillation ventriculaire, brûlures) et les seuils de dangerosité (tensions > 50V en milieu sec, > 25V en milieu humide). Le respect des procédures d'isolement, de consignation et l'usage des Équipements de Protection Individuelle (EPI) ne sont pas des options, mais

des impératifs vitaux. "Une main dans la poche" lors des mesures sous haute tension est une règle d'or qui sera rappelée constamment.

4.2. Protection du Matériel et des Composants

La sécurité concerne aussi le matériel. Les semi-conducteurs sont des composants fragiles. L'élève apprendra à respecter les valeurs limites absolues ("Absolute Maximum Ratings") fournies par les constructeurs : tension inverse maximale, courant de collecteur max, température de jonction max. Il sera sensibilisé aux dangers des décharges électrostatiques (ESD) qui peuvent détruire un transistor MOS ou un circuit intégré par simple contact. L'utilisation correcte des appareils de mesure est aussi un point de sécurité matérielle : ne jamais mesurer une tension avec le multimètre en position Ampèremètre (risque de court-circuit violent et destruction du fusible ou de l'appareil). La rigueur dans le câblage et la vérification systématique avant mise sous tension sont les garants de la longévité de l'équipement du laboratoire.

4.3. Normes et Standards

L'électronique est un langage universel régi par des normes. Ce cours s'appuiera sur les standards internationaux, principalement ceux de la Commission Électrotechnique Internationale (CEI). L'élève apprendra à utiliser les unités du Système International (SI) et leurs multiples/sous-multiples avec rigueur. Le code des couleurs des résistances, le marquage des condensateurs et le brochage normalisé des transistors (E-B-C, G-D-S) seront enseignés comme un alphabet de base. Nous insisterons sur l'importance de consulter les fiches techniques ("datasheets") des constructeurs, seule source de vérité technique fiable, plutôt que de se fier à des suppositions. Savoir lire une datasheet en anglais technique est une compétence clé qui sera développée tout au long du cursus.

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.

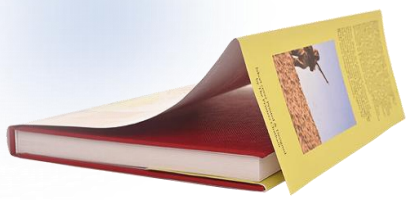
Pour l'excellence de l'éducation en RDC,
Tous les manuels scolaires en un seul endroit,
sur ce site web :
https://manuels-scolaires-rdc.com/

Pour plus de détails, scannez ceci :

PARTIE I

DES TUBES À VIDE AUX SEMI-CONDUCTEURS

Cette partie établit le pont entre la physique fondamentale de l'électron et les composants électroniques de base. Elle explore d'abord le principe historique de l'émission d'électrons dans le vide, qui a donné naissance aux premiers composants, avant d'introduire la technologie des semi-conducteurs qui a révolutionné le domaine. La fonction de redressement est étudiée à travers ces deux technologies.



Chapitre 1 : Émission Électronique et Diodes à Vide

1.1. Les Différents Types d'Émission Électronique

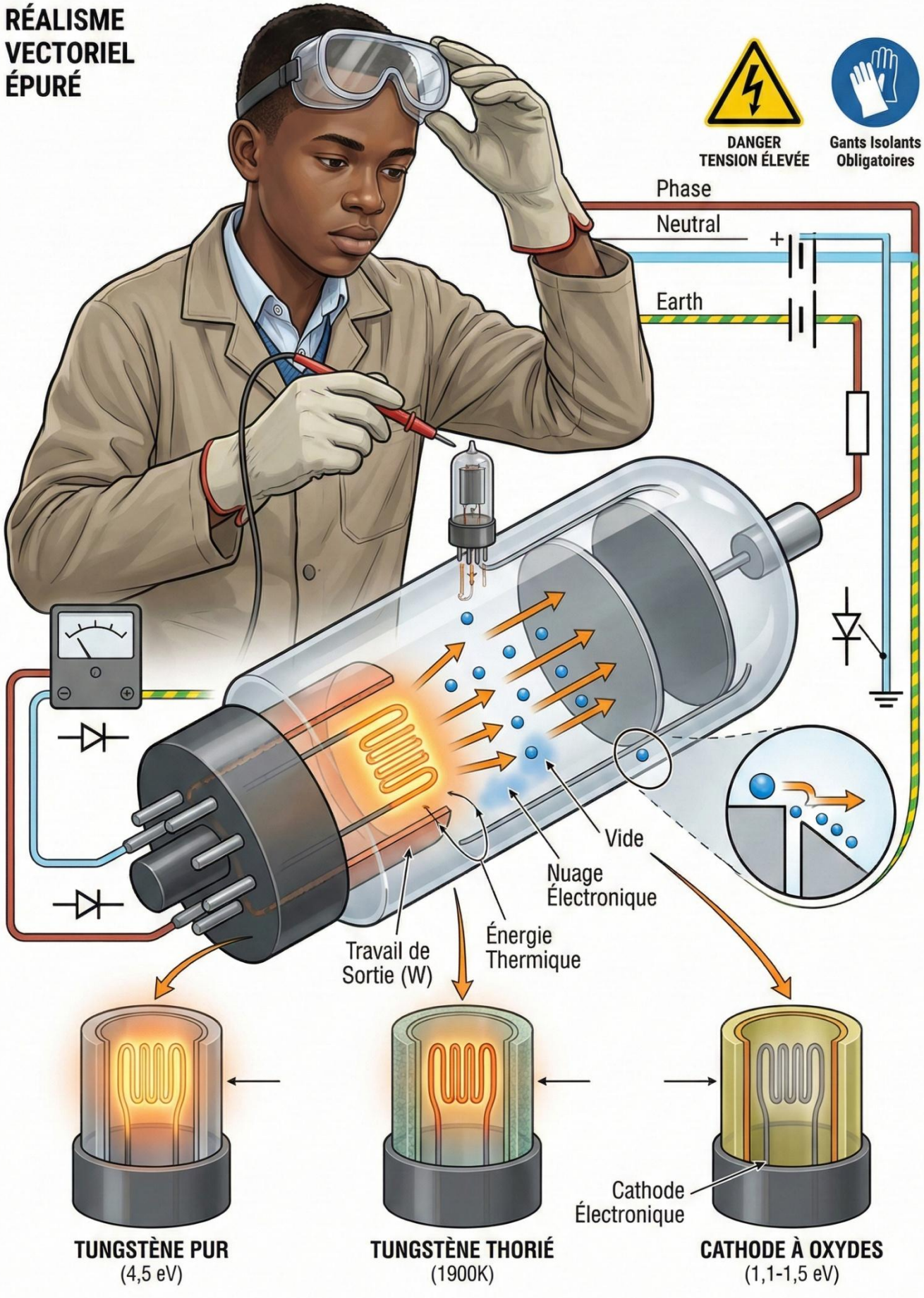
Le cours débute par l'étude des mécanismes permettant d'extraire des électrons d'un matériau, principalement l'émission thermoïonique (effet Edison). Le concept de « travail de sortie » est introduit comme l'énergie minimale à fournir pour arracher un électron. Tout conducteur contient des électrons libres qui se déplacent de manière aléatoire, mais ces derniers restent confinés à la surface du métal par des forces électrostatiques attractives. Pour qu'un électron franchisse cette barrière de potentiel, il doit acquérir une énergie cinétique supérieure au travail de sortie (W_s) spécifique au matériau, généralement exprimé en électron-volts (eV). L'apport d'énergie thermique augmente l'agitation des électrons, permettant à certains de vaincre cette force de rappel et de s'échapper dans le vide environnant, créant ainsi un nuage électronique.[1][2]

1.2. Technologie des Cathodes Chauffées

Les différentes technologies de cathodes (le filament qui émet les électrons) sont présentées : le tungstène pur, le tungstène thorié et les cathodes à oxydes. Leurs avantages respectifs en termes de température de fonctionnement et d'efficacité d'émission sont comparés. Le tungstène pur possède un travail de sortie élevé (environ 4,5 eV) et nécessite une température extrême de 2500 K pour émettre, ce qui le rend robuste mais énergivore. Le tungstène thorié, enrichi de 1 à 2% de thorium, abaisse ce travail de sortie à environ 2,6 eV, permettant une émission significative dès 1900 K. Enfin, les cathodes à oxydes (baryum et strontium) offrent le rendement le plus élevé avec un travail de sortie très faible (environ 1,1 à 1,5 eV), fonctionnant à une température modérée de 1000 K, idéales pour les tubes de réception et la petite puissance.[3][4][5][6][1]

Émission Électronique et Diodes à Vide

RÉALISME VECTORIEL ÉPURÉ



1.3. La Diode à Vide : Constitution et Fonctionnement

La diode à vide est présentée comme le premier composant électronique actif, constitué d'une cathode et d'une anode (ou plaque) dans une ampoule vidée d'air. Son fonctionnement de « clapet à électrons », ne laissant passer le courant que dans un seul sens (de la plaque vers la cathode), est expliqué. Lorsqu'une tension positive est appliquée à l'anode par rapport à la cathode chauffée, le champ électrique attire les électrons du nuage électronique vers la plaque, établissant un courant anodique. Inversement, si l'anode est négative, elle repousse les électrons vers la cathode : aucun courant ne circule, le composant est bloqué. Ce vide poussé est impératif pour éviter les collisions entre les électrons et les molécules de gaz, qui perturberaient le flux et endommageraient la cathode par bombardement ionique.

1.4. Caractéristique et Applications de la Diode à Vide

La courbe caractéristique d'une diode à vide (courant de plaque en fonction de la tension plaque-cathode) est tracée, montrant la zone de charge d'espace et la saturation. Son application historique principale, le redressement du courant alternatif, est introduite. À faible tension d'anode, le courant est limité par la « charge d'espace », une accumulation d'électrons autour de la cathode qui écranter le champ attractif de l'anode. Lorsque la tension augmente suffisamment, tous les électrons émis sont captés : on atteint alors le régime de saturation, où le courant dépend uniquement de la température de la cathode. Bien que remplacée par les semi-conducteurs dans la plupart des usages, la diode à vide reste pertinente pour la compréhension fondamentale de l'émission et subsiste dans certaines applications de très haute puissance, comme les émetteurs de radiodiffusion utilisés par la RTNC.[7]

1.5. Ressources complémentaires

1.5.1. Questions et réponses d'approfondissement

Pourquoi le vide est-il absolument critique dans une diode à émission thermoïonique ?

Le vide empêche l'oxydation instantanée du filament porté à haute température et supprime les obstacles mécaniques au trajet des électrons. La présence de gaz provoquerait des ionisations par choc, créant des ions positifs lourds qui, accélérés vers la cathode, la détruiraient physiquement par bombardement, un phénomène nommé « empoisonnement » ou destruction cathodique.

Quelle est la distinction physique exacte entre le régime de charge d'espace et le régime de saturation ?

En régime de charge d'espace, le nuage d'électrons stationnaire autour de la cathode repousse les nouveaux électrons émis, limitant le courant indépendamment de la capacité d'émission totale du filament ; le courant dépend alors de la tension anode-cathode (Loi de Child-Langmuir). En régime de saturation, le potentiel de l'anode est suffisant pour absorber ce nuage plus vite qu'il ne se forme ; le courant est alors maximum et ne dépend plus que de la température de la cathode (Loi de Richardson).

1.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter

Il est impératif de dissiper certaines approximations qui nuisent à la compréhension technique rigoureuse des tubes à vide.

- **Confusion sens du courant et flux d'électrons :** L'élève ne doit jamais confondre le sens conventionnel du courant (de l'anode vers la cathode) avec le déplacement physique des électrons (de la cathode vers l'anode).
- **La linéarité de la diode :** La diode à vide n'est pas une résistance linéaire obéissant simplement à $U = RI$. Sa caractéristique suit une loi de puissance (loi en $V^{3/2}$) dans sa zone utile, ce qui la distingue fondamentalement d'une résistance ohmique.

- **Le rôle du chauffage :** Augmenter la tension de chauffage ne sert pas à accélérer les électrons, mais uniquement à augmenter leur nombre par unité de temps (densité du nuage électronique). Seule la tension anodique (Haute Tension) communique l'énergie cinétique aux électrons.

1.6. Scenarios et Exercices

1.6.1. Scenarios d'assimilation

Scénario 1 : Le Diagnostic de l'Émetteur Muet

L'ingénieur Tambwe intervient sur un vieil émetteur AM de secours à Lubumbashi qui ne module plus, bien que la haute tension soit présente.

- Il observe que le filament du tube de puissance en tungstène thorié brille d'un éclat jaunâtre faible au lieu du blanc éblouissant habituel.
- Il mesure la tension aux bornes du filament et relève 8V au lieu des 12V nominaux, conséquence d'une chute de tension sur la ligne d'alimentation oxydée.
- Il en déduit que la température de la cathode est insuffisante (en dessous de 1900 K) pour permettre l'extraction des électrons, le tube restant en régime de « cut-off » thermique.
- Après nettoyage des connexions du transformateur de chauffage, la tension remonte à 12V, l'émission reprend et l'émetteur rayonne de nouveau.

Corrigé détaillé :

1. **Identification du symptôme :** L'éclat faible du filament indique une température inférieure à la normale.
2. **Lien causal physique :** L'émission thermoïonique dépend exponentiellement de la température (T). Pour du tungstène thorié, le seuil d'émission efficace se situe vers 1900 K.
3. **Analyse électrique :** Une tension de 8V sur une résistance nominale prévue pour 12V entraîne une puissance de chauffe $P = U^2/R$ réduite de plus de 55% ($8^2/12^2 \approx 0.44$), rendant l'émission impossible.

4. **Validation :** Le rétablissement de la tension nominale garantit que l'énergie thermique fournie aux électrons dépasse le travail de sortie ($W_s \approx 2.6eV$), rétablissant le courant anodique.

Scénario 2 : La Saturation Précoce

Lors d'un TP, une étudiante trace la courbe caractéristique d'une diode à vide et constate que le courant plafonne à 50 mA, alors que la fiche technique promet 150 mA.

- Elle vérifie la tension d'anode et constate qu'elle monte bien jusqu'à 300V, suffisant pour atteindre la saturation théorique.
- Elle suspecte alors que la limitation ne vient pas du champ électrique (anode), mais de la source d'électrons (cathode).
- Elle augmente légèrement la tension de chauffage de 6.3V à 7V (dans les limites tolérables) et voit le plafond de courant monter immédiatement à 75 mA.
- Elle conclut que la cathode est "pompée" ou usée : sa couche d'oxyde émissive s'est appauvrie, réduisant sa capacité d'émission totale (courant de saturation).

Corrigé détaillé :

1. **Analyse du graphe :** Un plateau horizontal sur la courbe $I_a = f(V_a)$ indique le régime de saturation.
2. **Diagnostic différentiel :** Si V_a augmente sans que I_a n'augmente, c'est que tous les électrons disponibles sont déjà captés. La limitation est donc l'émission cathodique.
3. **Test de confirmation :** Augmenter la température de cathode augmente l'énergie thermique et donc le nombre d'électrons extraits par seconde (Loi de Richardson). L'augmentation du courant de plateau confirme que la limite était thermique.
4. **Conclusion technique :** Le tube est en fin de vie car sa cathode ne peut plus fournir le débit électronique nominal, même à température correcte (perte de matière active).

Scénario 3 : L'Emballement de la Diode HT

Dans un laboratoire de physique, un redresseur haute tension à vide claque régulièrement avec des arcs internes bleutés.

- Le technicien remarque que le vide semble compromis (présence de gaz), ce qui est souvent signalé par une lueur bleue (ionisation).
- Il explique que les molécules de gaz résiduelles sont percutées par les électrons rapides, libérant des ions positifs.
- Ces ions, très massifs par rapport aux électrons, sont violemment attirés vers la cathode négative.
- Leur impact physique arrache des atomes de la cathode, la détruisant rapidement et créant des points chauds émissifs instables qui provoquent les arcs.

Corrigé détaillé :

1. **Observation visuelle :** La lueur bleue est la signature spectrale de l'ionisation des gaz résiduels (lueur de décharge).
2. **Mécanisme de défaillance :** L'ionisation crée un plasma conducteur qui court-circuite l'isolation par le vide.
3. **Conséquence physique :** Le bombardement ionique (retro-bombardement) détruit la structure atomique de la couche émissive de la cathode.
4. **Solution :** Le tube est physiquement altéré (perte d'étanchéité ou dégazage des électrodes) et doit être impérativement remplacé, car le vide ne peut être rétabli.

1.6.2. Exercices

Exercice 1 : Compréhension des matériaux (Texte à trous)

La _____ thermoïonique est le phénomène physique par lequel un matériau chauffé libère des électrons. Pour qu'un électron quitte la surface du métal, l'énergie thermique fournie doit être supérieure au _____ de sortie du matériau. Le tungstène pur nécessite une température très élevée d'environ _____ K, tandis que les cathodes à oxydes, plus efficaces, fonctionnent aux alentours de _____ K. Dans une diode à vide,

l'électrode positive qui attire les électrons se nomme l'_____, tandis que l'électrode chauffée émettrice est la _____.

Exercice 2 : Régimes de fonctionnement (Texte à trous)

Lorsque la tension d'anode est faible, les électrons forment un nuage stationnaire autour de la cathode appelé _____ d'espace, qui limite le courant. Si l'on augmente considérablement la tension anodique, la diode atteint le régime de **, où le courant ne peut plus augmenter même si la tension croît, car la cathode a atteint sa limite maximale d'**. Pour augmenter le courant dans ce régime précis, la seule solution est d'augmenter la _____ du filament.

Exercice 3 : Calcul de l'énergie cinétique (Raisonnement avec corrigé)

Question : Un électron est émis par la cathode avec une vitesse initiale nulle et est accéléré par une tension anodique V_a de 2000 V. Calculez l'énergie cinétique acquise par cet électron lorsqu'il frappe l'anode, exprimée en Joules et en électron-volts (eV). On donne la charge élémentaire $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C.
Réponse :

- L'énergie acquise en électron-volts est, par définition, égale à la différence de potentiel traversée.
- $E_c(eV) = 2000$ eV.
- Pour convertir en Joules, on applique la formule $E_c(J) = V_a \times e$.
- $E_c(J) = 2000 \times 1{,}6 \times 10^{-19} = 3{,}2 \times 10^{-16}$ Joules.

Exercice 4 : Puissance dissipée à l'anode (Raisonnement avec corrigé)

Question : Dans une diode de puissance utilisée dans un émetteur à Kinshasa, le courant anodique est de 500 mA et la tension anode-cathode est maintenue à 800 V. Calculez la puissance dissipée sous forme de chaleur par l'anode suite à l'impact des électrons. Si l'anode a une limite de dissipation de 350 W, le composant est-il en danger ? **Réponse :**

- La puissance dissipée par l'anode est le produit de la tension à ses bornes et du courant qui la traverse : $P_a = V_a \times I_a$.

- Conversion des unités : 500 mA $= 0{,}5$ A.
- Calcul : $P_a = 800 \times 0{,}5 = 400$ Watts.
- Conclusion : La puissance réelle (400 W) dépasse la limite constructeur (350 W). L'anode va rougir et risque de fondre ou de dégazer ; le point de fonctionnement est destructeur.

Exercice 5 : Comparaison d'efficacité (Raisonnement avec corrigé)

Question : Une cathode en tungstène nécessite 100 Watts de chauffage pour émettre 500 mA. Une cathode à oxydes nécessite seulement 5 Watts pour émettre le même courant. Calculez le rendement d'émission (en mA/W) pour chaque technologie et déduisez le rapport d'efficacité entre les deux. **Réponse :**

- Rendement Tungstène : $R_W = \frac{I_{emis}}{P_{chauf}} = \frac{500}{100} = 5$ mA/W.
- Rendement Oxydes : $R_{Ox} = \frac{500}{5} = 100$ mA/W.
- Rapport : $\frac{100}{5} = 20$.
- Conclusion : La cathode à oxydes est 20 fois plus efficace énergétiquement que la cathode en tungstène pur.

Exercice 6 : Analyse de la charge d'espace (Raisonnement sans corrigé)

Question : Vous observez une diode fonctionnant sous une tension d'anode de 50V. Le courant mesuré est de 100 mA. En supposant que la diode suit parfaitement la loi de Child-Langmuir ($I = k \cdot V^{3/2}$), quel sera le courant théorique si l'on double la tension d'anode à 100V, en admettant que nous ne sommes pas encore en saturation ?

Exercice 7 : Dimensionnement de protection (Raisonnement sans corrigé)

Question : Une diode à vide possède une tension inverse maximale de 1500 V. Vous l'utilisez pour redresser une tension alternative sinusoïdale de 600 V efficaces fournie par le réseau SNEL. Sachant que la tension de crête (maximale) est $V_{eff} \times \sqrt{2}$ et que lors du blocage, la diode supporte deux fois

cette crête dans certaines configurations (comme le redressement double alternance avec point milieu), cette diode est-elle un choix sécuritaire ? Justifiez par le calcul.

Exercice 8 : Diagnostic de panne filament (Raisonnement sans corrigé)

Question : Un tube électronique possède un filament spécifié pour 6.3V et 0.3A. Vous le mesurez à l'ohmmètre à froid (température ambiante) et trouvez une résistance de 2 Ohms. En appliquant la loi d'Ohm sur les valeurs nominales à chaud (U/I), calculez la résistance en fonctionnement. Comparez avec la résistance à froid et expliquez pourquoi la mesure à l'ohmmètre peut induire en erreur un technicien débutant qui croirait à un court-circuit.

Chapitre 2 : La Jonction P-N et la Diode à Semi-conducteur

2.1. Le Principe de la Jonction P-N

La technologie moderne des semi-conducteurs est introduite. La jonction P-N est présentée comme l'interface entre un semi-conducteur dopé P et un semi-conducteur dopé N, créant une barrière de potentiel qui s'oppose naturellement au passage du courant. Le dopage de type N (Négatif) introduit des atomes excédentaires en électrons (donneurs), tandis que le dopage de type P (Positif) introduit des atomes déficitaires en électrons (trous/accepteurs). Au moment de la mise en contact métallurgique de ces deux matériaux, un phénomène de diffusion instantané se produit : les électrons libres de la zone N migrent vers la zone P pour combler les trous. Cette recombinaison au niveau de la jonction fait disparaître les porteurs de charge libres, créant une « zone de déplétion » ou zone de charge d'espace (ZCE). Cette zone devient électriquement chargée (ions positifs côté N, ions négatifs côté P), générant un champ électrique interne qui finit par stopper la diffusion. Ce champ constitue une barrière de potentiel (environ 0,7 V pour le silicium) qu'il faudra vaincre pour établir un courant.

2.2. Polarisation de la Diode et Effet Redresseur

Le comportement de la diode à semi-conducteur est analysé. En polarisation directe, la barrière est abaissée et le courant passe. En polarisation inverse, la barrière est renforcée et le courant est bloqué. Cet effet de « soupape » unidirectionnelle est identique à celui de la diode à vide. Pour polariser la diode en direct, on applique le pôle positif du générateur à l'anode (zone P) et le négatif à la cathode (zone N). Cette tension externe repousse les trous et les électrons vers la jonction, réduisant la largeur de la zone de déplétion et abaissant la barrière de potentiel : dès que la tension dépasse le seuil (0,7 V), le courant circule massivement. En polarisation inverse (positif sur N, négatif sur P), les porteurs sont attirés loin de la jonction par la source externe. La zone de déplétion s'élargit considérablement, renforçant la barrière isolante. Seul un courant de fuite infime (courant de saturation inverse, I_s) circule, négligeable en pratique.[8]