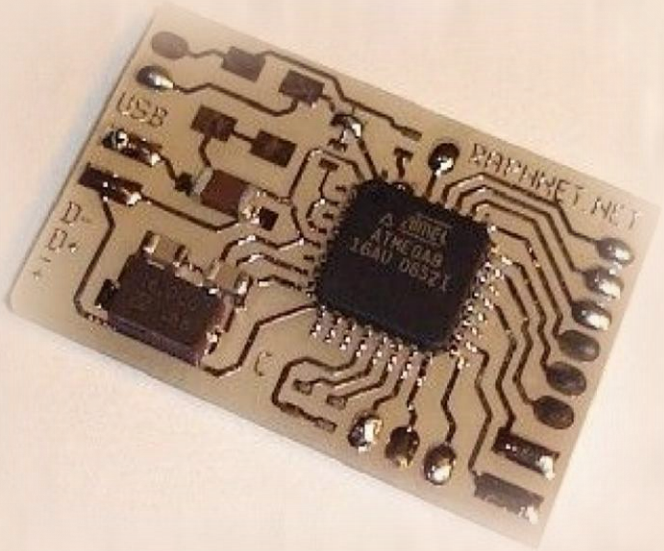
COURS DE

CIRCUIT ELECTRONIQUE.



CONFORME AU PROGRAMME NATIONAL

4è Année

Option ÉLECTRONIQUE

EDITION 2025



TABLE DES MATIÈRES

PRÉLIMINAIRES **1**

1. Objectifs Généraux du Cours 1
   - 1.1. Maîtrise des composants actifs 1
   - 1.2. Développement des capacités d'analyse de circuits 1
   - 1.3. Initiation à la conception et à la synthèse 1

2. Compétences Visées 2
   - 2.1. Compétence Analytique 2
   - 2.2. Compétence de Conception et de Synthèse 2
   - 2.3. Compétence Pratique et de Dépannage 2

3. Approche Pédagogique 2
   - 3.1. Une didactique de la convergence 2
   - 3.2. La démarche inductive et progressive 3
   - 3.3. L'évaluation par la résolution de problèmes 3

PARTIE 1. CIRCUITS DE COMMUTATION ET DE GÉNÉRATION DE SIGNAUX **4**

a. Le concept de commutation 4

b. La génération de signaux périodiques 4

c. La famille des multivibrateurs 4

d. Des applications concrètes et locales 4

CHAPITRE 1. LE TRANSISTOR EN RÉGIME DE COMMUTATION **5**

1.1. Les états de blocage et de saturation 5
   - a. L'interrupteur parfait et son cousin du Kwilu 5
   - A. Le transistor en état bloqué (Interrupteur ouvert) 5
   - B. Le transistor en état saturé (Interrupteur fermé) 5

FIGURE 1 : RÉF. IMG (1993-4361-2096) **7**

Droites de charge d'un transistor NPN en commutation 7
   - C. La commutation en pratique 7
   - SCÉNARIOS ET EXERCICES 8

1.2. Caractéristiques statiques et dynamiques du commutateur 10
   - a. L'interrupteur, un modèle parfait… mais lent 10

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- A. Caractéristiques statiques : le transistor au repos.....10

FIGURE 2 : RÉF. IMG (5842-7280-1661).....12

Courbes caractéristiques statiques d'un transistor bipolaire en commutation.....12

- B. Caractéristiques dynamiques : le transistor en mouvement.....12

FIGURE 3 : RÉF. IMG (0093-2129-7933).....15

Allure d'une impulsion de courant lors de la commutation du transistor.....15

- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....15

1.3. Le montage inverseur logique.....17

- a. La logique du contraire.....17
- A. Principe de fonctionnement du transistor en commutation.....18
- B. Le circuit inverseur à transistor.....18

FIGURE 4 : RÉF. IMG (8884-9563-2122).....20

Schéma du montage inverseur à transistor NPN avec résistances de base.....20

- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....20

1.4. Commande de charges.....22

- a. Le principe de la force démultipliée.....22
- A. Le transistor comme interrupteur.....23
- B. Commande d'une charge résistive et inductive.....23

FIGURE 5 : RÉF. IMG (4425-0796-4948).....25

Schéma d'un transistor NPN commandant un relais avec sa diode.....25

- C. Dimensionnement de la résistance de base.....25

CHAPITRE 2. LES MULTIVIBRATEURS ASTABLES ET MONOSTABLES.....28

2.1. Le multivibrateur astable.....28

- a. Un cœur qui bat sans s'arrêter.....28
- A. Principe de fonctionnement.....28
- B. Analyse du circuit à transistors.....28

2.2. Le multivibrateur monostable.....31

- Une seule impulsion, un seul état stable.....31
- A. Principe de fonctionnement.....31
- B. Applications courantes.....32

2.3. L'expression des périodes.....35

- La mesure du temps électronique.....35
- A. Période du multivibrateur astable (à transistors).....35

FIGURE 6 : RÉF. IMG (5447-2294-9807).....37

Schéma d'un multivibrateur astable et ses signaux de sortie carrés.....37

- B. Durée de l'état instable du monostable.....37

FIGURE 7 : RÉF. IMG (8965-0681-8188).....39

Schéma d'un monostable avec impulsion de déclenchement et sortie unique.....39

- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....39

2.4. Les oscillogrammes caractéristiques.....41

- a. L'œil électronique.....41
- A. Astable : Le signal qui ne dort jamais.....41
- B. Monostable : L'impulsion unique.....42

FIGURE 8 : RÉF. IMG (9530-4263-7132).....44

Comparaison visuelle des oscillogrammes astable et monostable sur oscilloscope.....44

- L'anecdote de l'émetteur de la RTNC à Mbuji-Mayi.....44

CHAPITRE 3. LES BASCULES (MULTIVIBRATEURS BISTABLES) ET LA MÉMORISATION....47

3.1. Le multivibrateur bistable.....47

- a. Le paradoxe de la mémoire électronique.....47
- A. Principe fondamental du multivibrateur bistable.....47

FIGURE 9 : RÉF. IMG (5364-3183-1237).....49

Schéma de principe d'un multivibrateur bistable à transistors NPN.....49

- B. Commande et sorties de la bascule.....49

3.2. La bascule RS.....52

- a. L'interrupteur qui se souvient.....52
- A. Principe et structure.....52
- B. Table de fonctionnement.....52
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....53

3.3. La bascule JK et la bascule D.....55

- a. Le problème de la mémoire.....55
- A. La bascule JK : L'universelle.....55
- B. La bascule D : La mémoire directe.....56

3.4. Applications des bascules....58
- a. Le défi de la mémoire électronique....58
- A. Les registres : la mémoire d'un mot binaire....59

FIGURE 10 : RÉF. IMG (8004-2295-6511)....61

Schéma d'un diviseur de fréquence avec une bascule JK....61
- B. Les compteurs et les diviseurs de fréquence....61

CHAPITRE 4. LES GÉNÉRATEURS DE SIGNAUX EN DENTS DE SCIE....64

4.1. Le principe du générateur de rampe....64
- a. L'essence du signal périodique non sinusoïdal....64
- A. La charge du condensateur à courant constant....64

FIGURE 11 : RÉF. IMG (8207-6913-4867)....65

Circuit RC de base et sa courbe de charge exponentielle non linéaire....65
- B. L'élément de commutation pour la décharge....65

FIGURE 12 : RÉF. IMG (2668-6874-7600)....68

Schéma de principe d'un générateur de rampe de tension idéal....68
- Scénarios et Exercices....68

4.2. Générateur de rampe simple....70
- a. La logique du réservoir qui se remplit....70
- A. Le principe de la charge à courant constant....70
- B. Structure du générateur simple....71

FIGURE 13 : RÉF. IMG (2547-0651-4726)....73

Schéma de principe d'un générateur de rampe à transistor BJT....73
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....73

4.3. La linéarisation de la rampe....75
- a. La quête de la ligne droite....75
- A. L'imperfection naturelle de la charge RC....75

FIGURE 14 : RÉF. IMG (3865-6231-0529)....78

Comparaison entre une charge exponentielle et une rampe de tension linéaire....78
- B. La solution : le générateur de courant constant....78

FIGURE 15 : RÉF. IMG (1035-7931-2505)....80

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Circuit pratique d'un générateur de courant constant utilisant un transistor 80
- Anecdote pour la salle des profs.....80

4.4. Symétrisation et dispositifs de charge/décharge.....82
- a. La quête de la ligne droite.....82
- A. La non-linéarité fondamentale de la charge RC.....82
- B. La source de courant constant : la solution idéale.....83

FIGURE 16 : RÉF. IMG (4332-3407-0023).....85

Circuit d'un générateur de courant constant à transistor bipolaire NPN.....85

FIGURE 17 : RÉF. IMG (4592-4783-3396).....87

Schéma d'une source de courant simple utilisant un transistor JFET.....87
- C. Le miroir de courant.....87

PARTIE 2. L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL ET SES APPLICATIONS LINÉAIRES.....90

La nécessité d'un composant universel.....90

L'amplificateur opérationnel : une brique de base.....90

Le modèle idéal : une simplification nécessaire.....90

Le régime linéaire : l'AOP en serviteur docile.....90

CHAPITRE 5. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL ET L'AMPLI-OP IDÉAL.....91

5.1. L'amplificateur différentiel.....91
- a. L'art de la comparaison.....91
- A. Principe de fonctionnement.....91
- B. Le Taux de Réjection du Mode Commun (TRMC).....91

FIGURE 18 : RÉF. IMG (1405-9144-9559).....94

Schéma de principe d'un amplificateur différentiel à deux transistors.....94
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....94

5.2. Caractéristiques de l'amplificateur opérationnel idéal.....96
- a. L'idéal comme outil de pensée.....96
- A. Gain en tension différentiel infini ().....96
- B. Impédances d'entrée et de sortie.....97

FIGURE 19 : RÉF. IMG (8943-1176-3657).....99

Schéma de l'amplificateur opérationnel idéal et ses cinq caractéristiques fon.....99

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- C. Bande passante infinie ()....99

5.3. Fonctionnement en régime linéaire : la contre-réaction....101

- a. Le paradoxe du gain infini....101
- A. Le principe de la contre-réaction négative....101

FIGURE 20 : RÉF. IMG (4756-9673-2028)....104

Schéma de principe d'un amplificateur inverseur à AOP avec sa contre-réaction....104

- B. La règle d'or : l'égalité des tensions d'entrée....104

5.4. L'amplificateur opérationnel réel (µA741)....106

- a. L'atterrissage sur la réalité....106
- A. Les imperfections notables....107
- B. La tension d'offset : l'erreur à l'origine....107

CHAPITRE 6. MONTAGES LINÉAIRES FONDAMENTAUX À AMPLI-OP....110

6.1. L'amplificateur inverseur....110

- a. Le principe de l'inversion contrôlée....110
- A. Principe de fonctionnement et schéma....110

FIGURE 21 : RÉF. IMG (9912-4786-9885)....112

Schéma de principe du montage amplificateur inverseur à ampli-op....112

- B. Démonstration de la formule du gain....112

FIGURE 22 : RÉF. IMG (4829-4960-3309)....115

Illustration de l'inversion de phase d'un signal sinusoïdal....115

- SCÉNARIOS ET EXERCICES....115
- Un dépannage inattendu à Mbandaka....115

6.2. L'amplificateur non-inverseur et le montage suiveur....117

- a. Une question de phase....117
- A. L'amplificateur non-inverseur....117

FIGURE 23 : RÉF. IMG (7885-8165-6795)....119

Schéma de principe d'un amplificateur opérationnel en montage non-inverseur....119

- B. Le montage suiveur (Buffer)....119

6.3. Le sommateur et le soustracteur (différentiel)....121

- a. L'analogie du mixage....121
- A. Le sommateur inverseur....122

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

FIGURE 24 : RÉF. IMG (7285-7586-9570)....123

Schémas des montages sommateur inverseur et soustracteur différentiel à AOP....123

- B. Le soustracteur (ou amplificateur différentiel)....123

6.4. L'intégrateur et le dérivateur....126

- a. Le calcul dans un circuit....126
- A. Le montage intégrateur....126

FIGURE 25 : RÉF. IMG (6091-3611-7090)....129

Schéma de principe du montage amplificateur-intégrateur idéal à ampli-op....129

- B. Le montage dérivateur....129

FIGURE 26 : RÉF. IMG (7064-3646-3872)....132

Schéma de principe du montage amplificateur-dérivateur idéal à ampli-op....132

- C. Scénarios et Exercices....132

CHAPITRE 7. LES FILTRES ACTIFS À BASE D'AMPLI-OP....135

7.1. Intérêt des filtres actifs....135

- a. L'art de séparer le bon grain de l'ivraie sonore....135
- A. Dépassement des limites des filtres passifs....135
- B. L'ampli-op, le cœur du filtre actif....135

FIGURE 27 : RÉF. IMG (4225-3294-7138)....138

Comparaison structurelle entre un filtre passif et un filtre actif....138

- b. Scénarios et Exercices....138

7.2. Le filtre passe-bas actif....140

- a. Une question de fréquence....140
- A. Structure et principe de fonctionnement....140
- B. Fréquence de coupure et gain en tension....141

7.3. Le filtre passe-haut actif....143

- a. Le principe du "laisser-passer" sélectif....143
- A. Structure et fonctionnement....144

FIGURE 28 : RÉF. IMG (2176-5720-9466)....146

Schéma du filtre passe-haut actif du premier ordre non-inverseur....146

- B. Fonction de transfert et fréquence de coupure....146

FIGURE 29 : RÉF. IMG (7381-8330-2527) **149**

Courbe de réponse en fréquence typique d'un filtre passe-haut actif 149

- SCÉNARIOS ET EXERCICES 149

7.4. Le filtre passe-bande actif 151

- a. L'analogie de la radio 151
- A. Principe de fonctionnement et grandeurs clés 151
- B. Structure à large bande passante (cascade) 152

PARTIE 3. ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE ET COMMANDE **155**

a. Le pont entre la force et l'intelligence 155

b. Les interrupteurs de la nouvelle ère 155

c. Des applications au cœur du Congo 155

d. La commande : le cerveau de l'opération 155

CHAPITRE 8. LE THYRISTOR (SCR) ET SON AMORÇAGE **156**

8.1. Définition et constitution du thyristor 156

- a. L'art de commander la puissance 156
- A. Définition et Symbole 156
- B. Constitution et Structure interne 156

FIGURE 30 : RÉF. IMG (0433-5499-6731) **158**

Symbole, structure P-N-P-N et modèle à deux transistors du thyristor 158

- SCÉNARIOS ET EXERCICES 158

8.2. Le principe de fonctionnement et la caractéristique d'anode 160

- a. Un interrupteur à mémoire 160
- A. Le modèle interne à deux transistors 160
- B. La caractéristique Anode-Cathode (en fonction de) 161

FIGURE 31 : RÉF. IMG (6641-6450-3220) **163**

Caractéristique tension-courant d'un thyristor (SCR) et ses zones de fonction 163

- Scénarios et Exercices 163

8.3. Les processus d'amorçage 165

- a. L'étincelle qui change tout 165
- A. L'amorçage par la gâchette (Gate Triggering) 165

FIGURE 32 : RÉF. IMG (0464-0136-3739) **168**

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Circuit de base pour l'amorçage d'un thyristor par la gâchette.....168
- B. Les autres méthodes d'amorçage (souvent non désirées).....168

FIGURE 33 : RÉF. IMG (7072-6371-2285).....171

Illustration des phénomènes d'amorçage non désirés sur un thyristor.....171
- Anecdote : La panne mystérieuse de l'atelier de Mbandaka.....171

8.4. Le processus de blocage.....173
- a. L'art d'arrêter un train en marche.....173
- A. La condition fondamentale : le courant de maintien ().....173
- B. Les techniques de blocage forcé (commutation forcée).....174

FIGURE 34 : RÉF. IMG (7243-2970-0744).....176

Chute du courant d'anode provoquant le blocage du thyristor.....176
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....176
- Le mystère du congélateur de Bandundu.....176

CHAPITRE 9. APPLICATIONS DU THYRISTOR EN COMMANDE DE PUISSANCE.....179

9.1. Le redresseur commandé.....179
- a. Le besoin de contrôle.....179
- A. Principe du redressement commandé monophasé.....179

FIGURE 35 : RÉF. IMG (0578-1905-4918).....181

Schéma d'un redresseur commandé et formes d'ondes associées.....181
- B. Tension moyenne de sortie.....181

FIGURE 36 : RÉF. IMG (3947-2945-9263).....184

Courbe de la tension moyenne en fonction de l'angle d'amorçage.....184
- Scénarios et Exercices.....184

9.2. Le contacteur statique (relais statique).....186
- a. L'évolution silencieuse.....186
- A. Principe de fonctionnement et structure.....186

FIGURE 37 : RÉF. IMG (0864-2611-0234).....189

Schéma de principe d'un contacteur statique à base de TRIAC.....189
- B. Avantages et limites pratiques.....189

9.3. Le hacheur (chopper).....192

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- a. Un interrupteur à la vitesse de l'éclair....192
- A. Principe de fonctionnement du hacheur série....192

FIGURE 38 : RÉF. IMG (6516-6406-3077)....194

Schéma de principe d'un hacheur série avec sa charge inductive....194

- B. Rapport cyclique et tension de sortie....194

FIGURE 39 : RÉF. IMG (8416-0253-6557)....197

Formes d'ondes caractéristiques de la tension et du courant d'un hacheur....197

- SCÉNARIOS ET EXERCICES....197

9.4. L'onduleur....199

- a. De la forge antique à la conversion de puissance....199
- A. Principe de fonctionnement....199
- B. Classification des onduleurs....200
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....200

CHAPITRE 10. LE TRIAC ET LA GRADATION DE PUISSANCE ALTERNATIVE....202

10.1. Constitution et principe du TRIAC....202

- a. Le défi du contrôle de puissance....202
- A. Structure et symbole du TRIAC....202

FIGURE 40 : RÉF. IMG (9965-7123-6085)....204

Symbole schématique et structure interne simplifiée du TRIAC....204

- B. Principe de fonctionnement et amorçage....204

FIGURE 41 : RÉF. IMG (2039-3366-2720)....207

Découpage de phase par le TRIAC sur une onde sinusoïdale....207

- C. Quadrants de fonctionnement....207

10.2. Caractéristiques et modes d'amorçage....210

- a. Du gaspillage à la précision....210
- A. Caractéristique Tension-Courant (V-I)....210

FIGURE 42 : RÉF. IMG (5663-7186-2092)....211

Courbe caractéristique tension-courant (V-I) d'un triac et son symbole....211

- B. Les Quatre Modes d'Amorçage....211

FIGURE 43 : RÉF. IMG (4355-9397-9106)....214

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Les quatre quadrants d'amorçage du triac selon les polarités appliquées.....214
- Anecdote : La panne du gradateur de la paroisse de Kingasani.....214

10.3. Le DIAC.....216
- a. L'interrupteur capricieux.....216
- A. Structure, Symbole et Caractéristique.....216

FIGURE 44 : RÉF. IMG (6696-4005-5043).....217

Structure, symbole et courbe caractéristique du DIAC.....217
- B. Le DIAC comme élément de déclenchement.....217

10.4. Le gradateur de lumière à commande de phase.....219
- a. Du gaspillage à l'intelligence.....219
- A. Le principe de la commande par angle de phase.....220

FIGURE 45 : RÉF. IMG (7989-1980-6294).....222

Formes d'onde de la tension dans un gradateur à commande de phase.....222
- B. Le circuit de déphasage RC.....222

FIGURE 46 : RÉF. IMG (4431-6371-4465).....225

Schéma de principe d'un gradateur de lumière à triac et diac.....225
- C. Scénarios et Exercices.....225

ANNEXES.....228

1. Mémento des Montages à Ampli-Op.....228
- A. L'Amplificateur Opérationnel Parfait (Modèle Idéal).....228
- B. Les Deux Règles d'Or de l'Analyse (Régime Linéaire).....228
- C. Montages Linéaires Fondamentaux.....229
- D. Montages Non-Linéaires (Comparaison).....230

2. Guide de Choix d'un Amplificateur Opérationnel.....231
- A. Paramètres Statiques (DC).....231
- B. Paramètres Dynamiques (AC).....232
- C. Caractéristiques d'Entrée et de Sortie.....233
- D. Typologies Technologiques et Compromis.....234

3. Tableau Comparatif des Composants de l'Électronique de Puissance.....235
- A. La Diode de Puissance.....235
- B. Le Thyristor (SCR - Silicon Controlled Rectifier).....236
- C. Le Transistor Bipolaire de Puissance (BJT).....236

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- D. Le MOSFET de Puissance (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor).....237
- E. Le Transistor Bipolaire à Grille Isolée (IGBT).....238

4. Schémas de Circuits de Commande de Gâchette.....238
   - A. Fondements et Rôle du Circuit de Commande.....238
   - B. Typologies des Circuits de Commande.....239
   - C. Contraintes de Conception et Phénomènes Parasites.....240

PRÉLIMINAIRES

1. Objectifs Généraux du Cours

Ce programme de quatrième année structure l'acquisition de compétences avancées en électronique. Son architecture pédagogique vise à consolider les acquis fondamentaux tout en introduisant les principes des circuits à semi-conducteurs. La finalité est de former des techniciens capables d'analyser, de concevoir et de maintenir des systèmes électroniques analogiques de complexité intermédiaire.

1.1. Maîtrise des composants actifs

L'objectif premier est de dépasser l'étude des circuits passifs. L'élève doit maîtriser le principe de fonctionnement, les modèles équivalents et les courbes caractéristiques des composants actifs fondamentaux. Cela inclut les diodes à jonction (redressement, Zener) et les transistors bipolaires (BJT) et à effet de champ (JFET, MOSFET). La connaissance de leurs zones de fonctionnement est un prérequis essentiel.

1.2. Développement des capacités d'analyse de circuits

À l'issue du cours, l'élève doit pouvoir analyser un circuit électronique de manière systématique. Il applique les théorèmes généraux de l'électricité pour déterminer le point de polarisation (analyse DC) des circuits à transistors. Subséquemment, il utilise le modèle en petits signaux (analyse AC) pour calculer les paramètres clés d'un montage, tels que le gain en tension, le gain en courant et les impédances d'entrée et de sortie.

1.3. Initiation à la conception et à la synthèse

Le cours initie l'élève à la démarche de conception. Partant d'un cahier des charges simple, il doit être en mesure de synthétiser des circuits fonctionnels. Cela concerne principalement les étages amplificateurs de base (émetteur commun, collecteur commun) et les alimentations stabilisées simples. Le choix des composants et le calcul de leurs valeurs constituent le cœur de cette compétence.

2. Compétences Visées

L'achèvement de ce programme dote l'élève d'une triple compétence fondamentale. Ce socle est indispensable à la poursuite d'études supérieures ou à l'intégration professionnelle immédiate dans le secteur technique.

2.1. Compétence Analytique

L'élève identifie avec rigueur les fonctions et les interactions des composants au sein d'un montage électronique. Il interprète les signaux d'entrée et de sortie en mobilisant les lois fondamentales de l'électricité et les modèles des semi-conducteurs. Cette capacité lui permet de prévoir le comportement théorique d'un circuit en régime statique et dynamique, notamment pour les amplificateurs, les oscillateurs et les circuits logiques.

2.2. Compétence de Conception et de Synthèse

Au-delà de l'analyse, l'élève acquiert la capacité de concevoir une solution électronique répondant à un besoin spécifique. Il traduit un cahier des charges fonctionnel en un schéma structurel viable. Sa démarche inclut le choix pertinent des composants, le dimensionnement de leurs valeurs nominales, le calcul des points de polarisation et la justification théorique du fonctionnement attendu.

2.3. Compétence Pratique et de Dépannage

La finalité opérationnelle du programme se manifeste par la compétence pratique. L'élève réalise physiquement les montages conçus, en respectant les règles de câblage et de sécurité électrique. Il utilise avec méthode les appareils de mesure (oscilloscope, multimètre, générateur de fonctions) pour valider les performances du circuit et les comparer aux calculs théoriques. La détection et la correction systématique des pannes par un raisonnement logique constituent l'aboutissement de cette compétence.

---

3. Approche Pédagogique

3.1. Une didactique de la convergence

Cet ouvrage articule la théorie fondamentale et l'expérimentation pratique. La maîtrise de l'électronique exige la capacité de traduire un schéma abstrait en un montage fonctionnel. Chaque concept théorique, des lois de Kirchhoff aux théorèmes de Thévenin et Norton, est systématiquement validé par une

application concrète ou un exercice de simulation. Cette méthode vise la construction d'un raisonnement tangible, où l'équation ne se sépare jamais du comportement mesurable du composant sur une platine d'essai. L'abstraction mathématique sert l'objectif de la prédiction du comportement physique du circuit.

3.2. La démarche inductive et progressive

Chaque chapitre est conçu comme une brique logique s'ajoutant aux précédentes. La progression part du composant isolé vers son intégration dans des sous-systèmes simples, puis dans des circuits complexes. L'élève analyse d'abord une diode, puis un pont redresseur, et enfin une alimentation stabilisée complète. Cette approche inductive et spiralaire renforce l'assimilation. L'objectif est de structurer la pensée de l'élève pour qu'il puisse, à terme, analyser un système inconnu en le décomposant en blocs fonctionnels qu'il a déjà maîtrisés.

3.3. L'évaluation par la résolution de problèmes

Les exercices et scénarios proposés ont une fonction centrale dans le processus d'apprentissage. Ils dépassent la simple vérification des connaissances pour devenir des mises en situation techniques. Ces problèmes sont formulés pour refléter des défis réalistes, du dépannage d'un amplificateur audio dans un petit atelier de Goma à la conception d'un système de signalisation simple pour un projet à Mbuji-Mayi. La résolution favorise le développement de compétences de diagnostic, de méthode et d'ingéniosité, préparant l'élève aux exigences du terrain et aux épreuves certificatives de l'Examen d'État.

Partie 1. Circuits de commutation et de génération de signaux

a. Le concept de commutation

Un transistor possède une fonction d'amplification. Il opère aussi comme un interrupteur électronique ultra-rapide. Cette capacité à passer de l'état bloqué (OFF) à l'état saturé (ON) fonde toute l'électronique numérique. Un courant de commande infime sur la base ou la grille contrôle le passage d'un courant bien plus important. C'est le principe du "tout ou rien" gouvernant le monde digital.

b. La génération de signaux périodiques

Créer un rythme électronique est l'objectif des circuits de génération. Ces montages, appelés oscillateurs, produisent des signaux périodiques sans nécessiter de signal d'entrée pour les déclencher. Le signal carré, avec ses transitions nettes entre un niveau haut et un niveau bas, est le plus fondamental. Il sert d'horloge pour synchroniser les opérations dans les microprocesseurs, des plus simples aux plus complexes.

c. La famille des multivibrateurs

Les circuits de commutation se classent en trois familles de multivibrateurs. L'astable oscille en permanence, sans état stable. Le monostable possède un seul état stable et bascule temporairement sur impulsion. Le bistable, lui, dispose de deux états stables ; il forme la brique de base des mémoires (bascules). Chaque type répond à un besoin précis : générer, temporiser ou mémoriser une information binaire.

d. Des applications concrètes et locales

Pratiquement, ces montages animent notre quotidien. Le clignotement d'une enseigne lumineuse à Mbuji-Mayi au Kasaï utilise un astable. La minuterie d'un système d'irrigation dans la plaine du Kwilu repose sur un monostable. La simple mémorisation d'un choix dans un jeu électronique à Kisangani emploie un bistable. Comprendre ces circuits ouvre la porte à la réparation et à la conception de nombreux appareils utiles.

Chapitre 1. Le transistor en régime de commutation

1.1. Les états de blocage et de saturation

a. L'interrupteur parfait et son cousin du Kwilu

Un des faits les plus paradoxaux de l'électronique numérique repose sur une action binaire. Tout l'univers digital, de la simple calculatrice à l'ordinateur le plus puissant de l'UNIKIN, fonctionne sur la base d'un principe simple : "marche" ou "arrêt". C'est l'équivalent d'un interrupteur.

Cette fonction d'interrupteur est assurée par le transistor en régime de commutation. Plutôt que de moduler un signal de manière continue, il adopte deux états extrêmes. Ces deux positions, "ouvert" et "fermé", sont les clés du langage binaire, le fameux 0 et 1, qui animent tous nos appareils.

A. Le transistor en état bloqué (Interrupteur ouvert)

Un transistor est dit bloqué lorsque le courant ne peut quasiment pas circuler entre son collecteur et son émetteur. Il se comporte comme un interrupteur ouvert.

Pour obtenir cet état, la tension entre la base et l'émetteur (V_{BE}) doit être inférieure au seuil de conduction, typiquement 0,7 V pour un transistor au silicium. Dans ces conditions, aucun courant de base (I_B) significatif ne circule. Le courant de collecteur (I_C) est alors réduit à son minimum, un très faible courant de fuite appelé I_{CEO}.

Cet état correspond au niveau logique "0".

B. Le transistor en état saturé (Interrupteur fermé)

Un transistor est en état de saturation lorsqu'il conduit le courant maximal possible entre son collecteur et son émetteur. Il agit alors comme un interrupteur fermé.

Pour atteindre la saturation, un courant de base (I_B) suffisant doit être appliqué pour "inonder" la jonction base-émetteur. La tension collecteur-émetteur (V_{CE}) chute à sa valeur minimale, notée V_{CEsat} (environ 0,2 V). Le courant de collecteur (I_C) n'est alors plus contrôlé par I_B mais est limité

uniquement par les composants du circuit externe, comme la résistance de collecteur R_C. Sa valeur maximale est $I_{Csat} \approx \frac{V_{CC}}{R_C}$.

Cet état correspond au niveau logique "1".

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Figure 1 : Réf. IMG (1993-4361-2096)

Droites de charge d'un transistor NPN en commutation

a. Analyse des points de fonctionnement

Ce graphique illustre le comportement du transistor. L'axe vertical représente le courant de collecteur (I_C) et l'axe horizontal la tension collecteur-émetteur (V_{CE}). La ligne oblique est la "droite de charge", déterminée par l'alimentation V_{CC} et la résistance de charge R_C. Les points de fonctionnement du transistor en commutation se situent aux extrémités de cette droite.

b. Le point de blocage (OFF)

Le point de blocage est situé sur l'axe horizontal. À cet endroit, le courant de collecteur I_C est quasi nul. La tension V_{CE} est maximale et égale à la tension d'alimentation V_{CC}. Le transistor est "ouvert" et ne conduit pas. C'est l'état "0".

c. Le point de saturation (ON)

Le point de saturation se trouve sur l'axe vertical. Ici, le courant de collecteur I_C atteint sa valeur maximale, I_{Csat}. La tension V_{CE} est minimale, proche de zéro (V_{CEsat}). Le transistor est "fermé" et conduit pleinement. C'est l'état "1".

C. La commutation en pratique

En pratique, pour faire passer un transistor du blocage à la saturation, on applique un signal de commande sur sa base.

- Un signal de tension bas (proche de 0 V) sur la base bloque le transistor.
- Un signal de tension haut (par exemple, 5 V) sur la base, via une résistance de base appropriée, le sature.

La vitesse à laquelle le transistor bascule entre ces deux états est un paramètre crucial, déterminant la fréquence maximale de fonctionnement d'un circuit numérique.

SCÉNARIOS ET EXERCICES

a. Anecdote : La panne de l'émetteur de Mbandaka

Papa Simon, technicien chevronné de la RTNC à Mbandaka, province de l'Équateur, recevait des plaintes. L'émetteur radio local tombait en panne par intermittence. Junior, un jeune stagiaire fraîchement sorti de l'ISTM, l'accompagnait. Alors que Papa Simon vérifiait les alimentations, Junior, armé de son multimètre et de ses cours, se concentra sur l'étage de puissance final. Il remarqua qu'un des transistors de puissance bipolaires, censé commuter un signal haute fréquence, ne le faisait pas. Il mesura la tension V_{CE} et la trouva bloquée à la valeur de l'alimentation, même lorsque la base était commandée. Le transistor était "collé" en état bloqué, incapable de saturer. La panne venait d'un simple composant refusant de jouer son rôle d'interrupteur, paralysant tout le système.

Exercice 1 : Le voyant de charge solaire

Énoncé : Maman Eliane à Lubumbashi (Haut-Katanga) utilise un petit panneau solaire pour charger une batterie de 12 V. Pour savoir si le panneau produit assez de courant pour la charge, vous devez concevoir un circuit simple qui allume une LED rouge. La LED s'allume quand le transistor est saturé. Données : $V_{CC}=12\,\text{V}$, tension de la LED $V_{LED}=2\,\text{V}$, courant désiré dans la LED $I_C=20\,\text{mA}$, gain du transistor $\beta=100$, tension de commande sur la base $V_{cmd}=5\,\text{V}$, $V_{BEsat}=0,7\,\text{V}$. Calculez la résistance de collecteur R_C et la résistance de base R_B.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Calcul de la résistance de collecteur (R_C)** Quand le transistor est saturé, $V_{CEsat}\approx 0,2\,\text{V}$. La tension aux bornes de R_C est $V_{CC}-V_{LED}-V_{CEsat}$.

$$R_C=\frac{V_{CC}-V_{LED}-V_{CEsat}}{I_C}=\frac{12\,\text{V}-2\,\text{V}-0,2\,\text{V}}{20\times10^{-3}\,\text{A}}=\frac{9,8\,\text{V}}{0,02\,\text{A}}=490\,\Omega$$

   On choisit une valeur normalisée proche, par exemple $470\,\Omega$.

2. **Étape 2 : Calcul du courant de base minimal (I_{Bmin})** Ce courant est le courant nécessaire pour juste atteindre la saturation.

$$I_{Bmin}=\frac{I_C}{\beta}=\frac{20\,\text{mA}}{100}=0,2\,\text{mA}$$

3. **Étape 3 : Calcul de la résistance de base (R_B)** Pour garantir une saturation profonde, on utilise un courant de base supérieur, par exemple $I_B = 2 \times I_{Bmin} = 0,4\,\text{mA}$.

$$R_B = \frac{V_{cmd} - V_{BEsat}}{I_B} = \frac{5\,\text{V} - 0,7\,\text{V}}{0,4 \times 10^{-3}\,\text{A}} = \frac{4,3\,\text{V}}{0,0004\,\text{A}} = 10750\,\Omega$$

On choisit une valeur normalisée inférieure, comme $10\,\text{k}\Omega$, pour assurer une bonne saturation.

Exercice 2 : La commande d'un relais au Kasaï

Énoncé : Un étudiant de l'U.O. à Kananga (Kasaï-Central) veut commander un petit relais 12 V avec la sortie 5 V d'un microcontrôleur. Le relais a une bobine de $240\,\Omega$. Le transistor utilisé a un $\beta_{min} = 50$. Le signal de commande est de 5 V. Calculez la résistance de base R_B nécessaire pour saturer le transistor et activer le relais.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Calcul du courant de collecteur requis (I_C)** Le courant de collecteur doit être suffisant pour activer le relais. Ce courant est déterminé par la tension d'alimentation du relais et la résistance de sa bobine.

$$I_C = \frac{V_{relais}}{R_{bobine}} = \frac{12\,\text{V}}{240\,\Omega} = 0,05\,\text{A} = 50\,\text{mA}$$

2. **Étape 2 : Calcul du courant de base minimal (I_{Bmin})** On utilise le gain minimal (β_{min}) pour être certain de saturer le transistor dans le pire des cas.

$$I_{Bmin} = \frac{I_C}{\beta_{min}} = \frac{50\,\text{mA}}{50} = 1\,\text{mA}$$

3. **Étape 3 : Calcul de la résistance de base (R_B)** La tension aux bornes de R_B est la tension de commande moins la chute de tension base-émetteur.

$$R_B = \frac{V_{cmd} - V_{BEsat}}{I_{Bmin}} = \frac{5\,\text{V} - 0,7\,\text{V}}{1 \times 10^{-3}\,\text{A}} = \frac{4,3\,\text{V}}{0,001\,\text{A}} = 4300\,\Omega$$

Une valeur normalisée inférieure, comme $3,9\,\text{k}\Omega$, sera un choix sûr.

1.2. Caractéristiques statiques et dynamiques du commutateur

a. L'interrupteur, un modèle parfait… mais lent

Pendant des décennies, l'interrupteur mécanique a représenté le modèle absolu du "tout ou rien". Sa bascule est perçue comme instantanée : le courant passe ou il ne passe pas. Aucun état intermédiaire ne semble exister dans cette action binaire, simple et efficace. C'est l'idéal du commutateur parfait.

Cette vision idéalisée trouve rapidement ses limites en électronique. Un transistor utilisé en commutation, bien que prodigieusement rapide, n'est jamais instantané. Il possède des états stables, dits "statiques", et des phases de transition, dites "dynamiques". Ces caractéristiques définissent sa performance réelle, sa vitesse et ses contraintes d'utilisation.

A. Caractéristiques statiques : le transistor au repos

Les caractéristiques statiques décrivent le comportement du transistor dans ses deux états stables : bloqué et saturé. Elles sont mesurées lorsque les tensions et courants de commande sont appliqués depuis un certain temps.

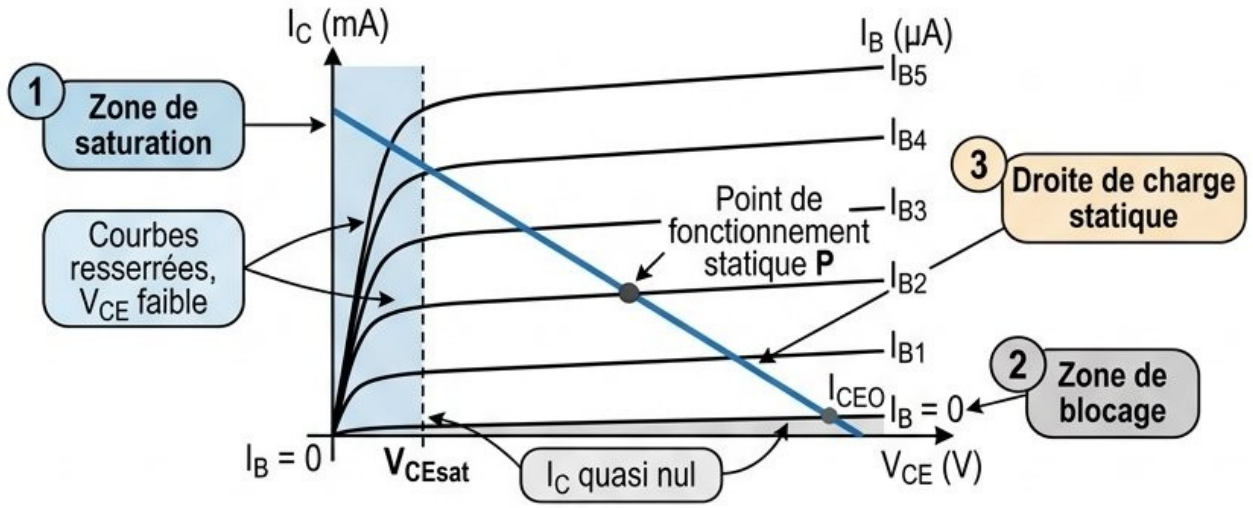
Un transistor bloqué se comporte comme un interrupteur ouvert. Idéalement, aucun courant ne devrait le traverser. En réalité, un très faible courant de fuite, noté I_{CEO} (courant Collecteur-Émetteur avec base ouverte), subsiste.

Un transistor saturé se comporte comme un interrupteur fermé. Idéalement, la tension à ses bornes devrait être nulle. En réalité, une petite tension résiduelle, notée V_{CEsat} (tension Collecteur-Émetteur de saturation), demeure.

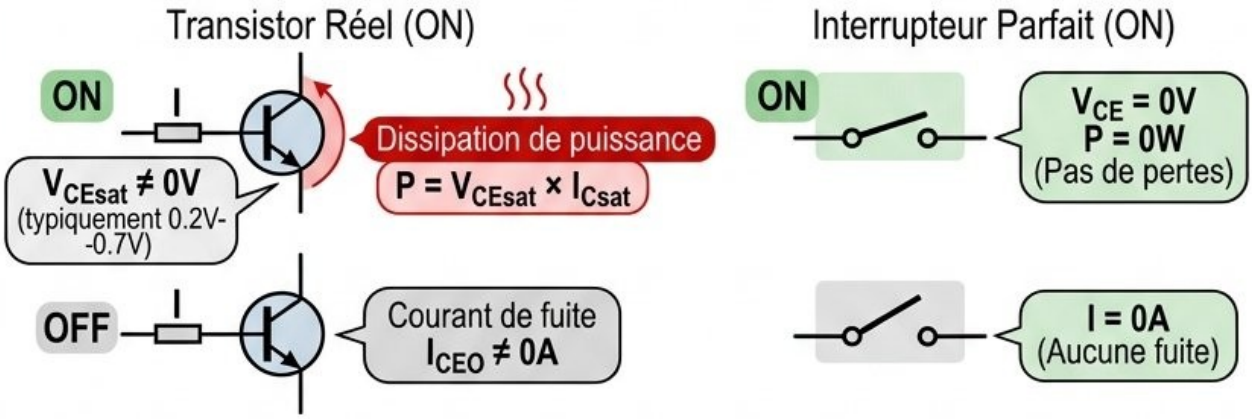
Figure 2 : Réf. IMG (5842-7280-1661)

Courbes caractéristiques statiques d'un transistor bipolaire en commutation

a. Zones de fonctionnement



b. L'imperfection du commutateur



c. Utilité pour le dimensionnement

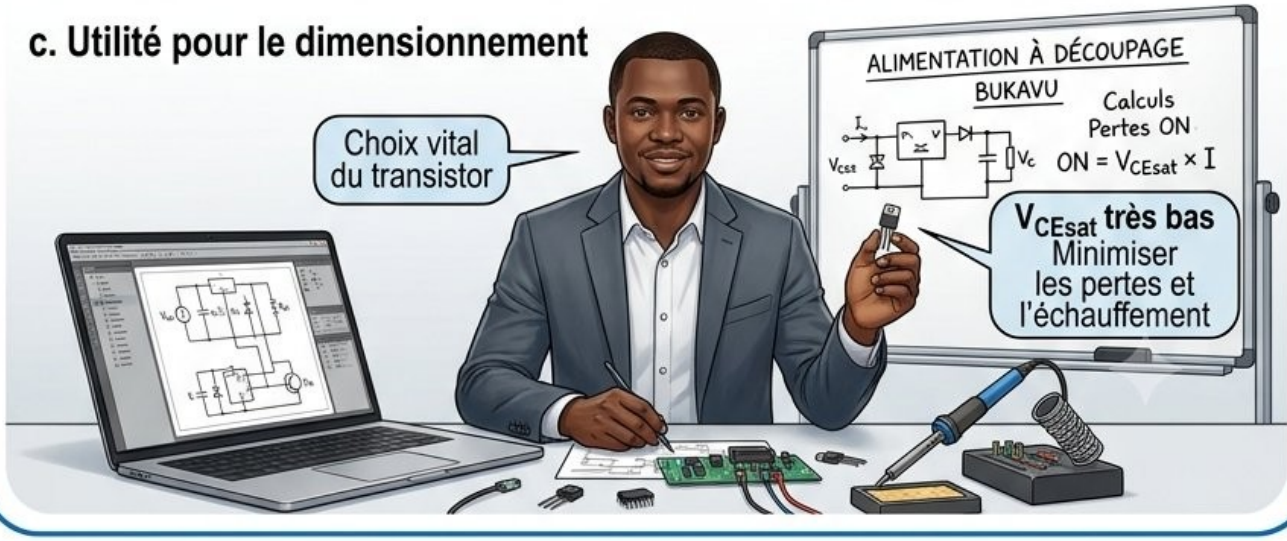


Figure 2 : Réf. IMG (5842-7280-1661)

Courbes caractéristiques statiques d'un transistor bipolaire en commutation

a. Zones de fonctionnement

Le graphique montre les courbes $I_C = f(V_{CE})$ pour différentes valeurs du courant de base I_B. La zone de blocage correspond à $I_B = 0$, où le courant I_C est quasi nul. La zone de saturation est la région où les courbes se resserrent près de l'axe vertical, pour une tension V_{CE} très faible (V_{CEsat}). La droite de charge statique relie le point de blocage au point de saturation.

b. L'imperfection du commutateur

La tension V_{CEsat} n'est jamais nulle (typiquement 0.2V à 0.7V). Elle cause une dissipation de puissance par effet Joule ($P = V_{CEsat} \times I_{Csat}$) lorsque le transistor est "ON". De même, le courant de fuite I_{CEO} n'est jamais parfaitement nul, bien que souvent négligeable à basse température. Ces deux paramètres mesurent l'écart entre le transistor réel et l'interrupteur parfait.

c. Utilité pour le dimensionnement

Connaître ces valeurs est vital. Un ingénieur à Bukavu qui conçoit une alimentation à découpage doit choisir un transistor avec un V_{CEsat} très bas pour minimiser les pertes et l'échauffement. Le choix dépend donc directement de ces données statiques fournies par le fabricant.

B. Caractéristiques dynamiques : le transistor en mouvement

Les caractéristiques dynamiques décrivent le comportement du transistor pendant la transition d'un état à un autre. Elles définissent sa vitesse de commutation. Cette vitesse n'est pas infinie à cause des capacités parasites internes au composant.

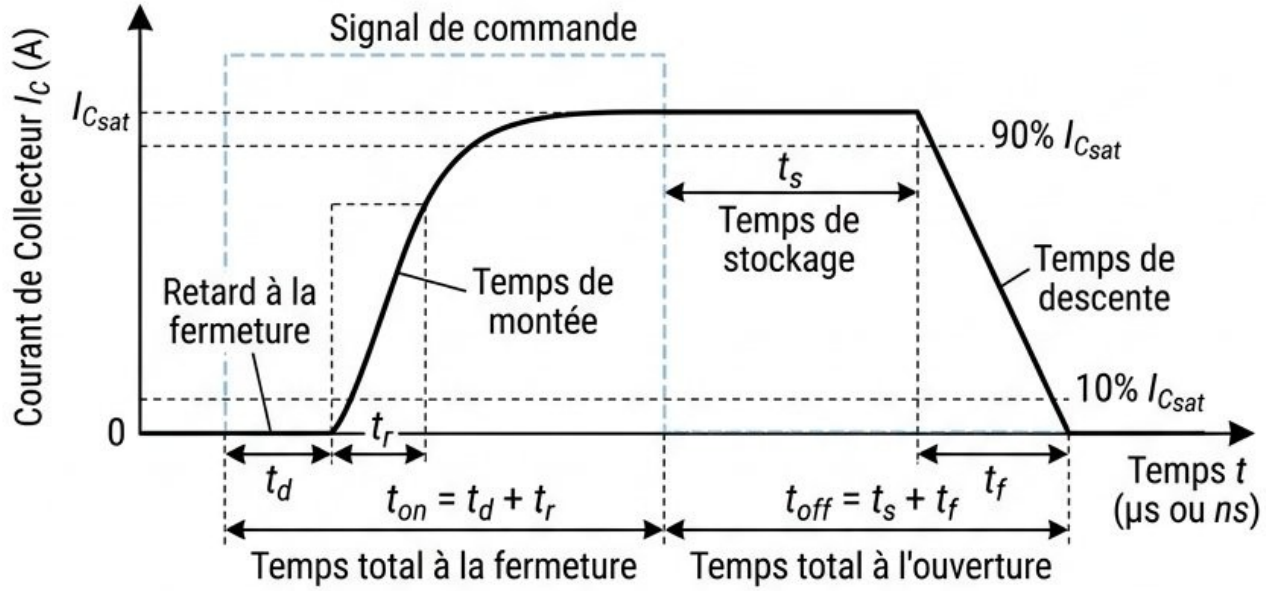
Quatre temps principaux caractérisent la commutation : - **Temps de délai (t_d)** : Le temps entre l'application de la commande et le début de la réaction du transistor. - **Temps de montée (t_r)** : Le temps que met le courant de collecteur pour passer de 10% à 90% de sa valeur finale. - **Temps de stockage (t_s)** : Le temps nécessaire pour évacuer les charges stockées dans la base lors du passage de la saturation au blocage. - **Temps de descente (**

t_f**)** : Le temps que met le courant de collecteur pour passer de 90% à 10% de sa valeur.

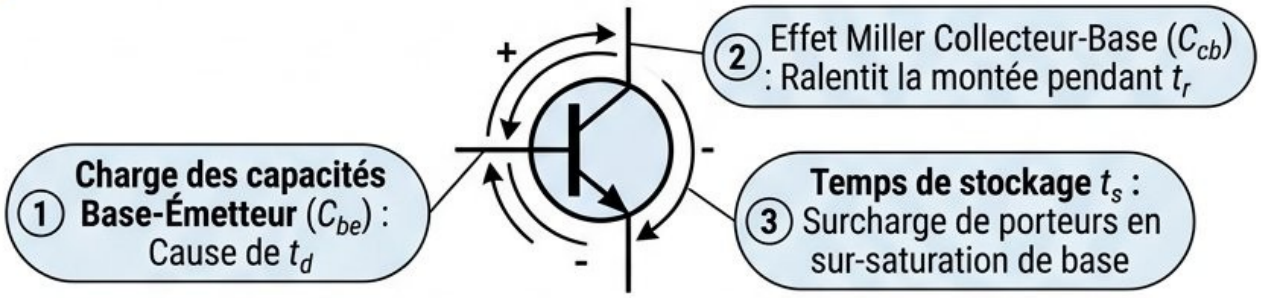
Figure 3 : Réf. IMG (0093-2129-7933)

Allure d'une impulsion de courant lors de la commutation du transistor

A. CHRONOGRAMME DU COURANT DE COLLECTEUR (I_C) LORS DE LA COMMUTATION

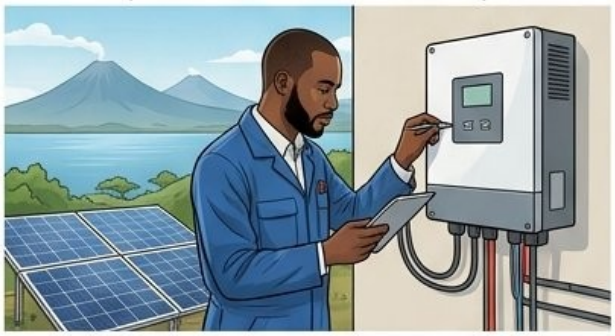


B. ORIGINE PHYSIQUE DES DÉLAIS : CHARGE DES CAPACITÉS



C. IMPACT SUR LA FRÉQUENCE ET APPLICATIONS RÉELLES EN RDC

Commutation Moyenne Fréquence
(ex : Convertisseur Goma)



Fréquences de dizaines de kHz.
Transistors de puissance.

Commutation Haute Fréquence
(ex : Processeur d'ordinateur)



Fréquences de plusieurs GHz.
Transistors ultra-rapides (ns).

Figure 3 : Réf. IMG (0093-2129-7933)

Allure d'une impulsion de courant lors de la commutation du transistor

a. Visualisation des temps de commutation

Ce chronogramme illustre le décalage et la déformation du signal de sortie (I_C) par rapport au signal de commande idéal. Le signal ne monte pas et ne descend pas instantanément. Les temps t_d, t_r, t_s et t_f quantifient ce phénomène. Le temps total de commutation à la fermeture est $t_{on}=t_d+t_r$, et à l'ouverture $t_{off}=t_s+t_f$.

b. L'origine physique des délais

Ces retards proviennent des capacités de jonction du transistor. Pour passer de bloqué à saturé, il faut charger ces capacités. Pour revenir à l'état bloqué, il faut les décharger. Le temps de stockage t_s, souvent le plus pénalisant, est dû à la "sur-saturation" du transistor.

c. L'impact sur la fréquence

La somme de ces temps limite la fréquence maximale de commutation. Un système qui doit commuter des millions de fois par seconde, comme dans un convertisseur de puissance à Goma ou un processeur d'ordinateur, exige des transistors avec des temps dynamiques extrêmement faibles, de l'ordre de la nanoseconde.

■ ■ ■

SCÉNARIOS ET EXERCICES

L'émetteur radio de Mbandaka et le secret de la vitesse

Papa Jean, technicien chevronné à la station radio de Mbandaka, dans la province de l'Équateur, est perplexe. L'un de ses émetteurs de secours produit un son grésillant et déformé, surtout sur les fréquences élevées. Après des heures de vérification des antennes et des câbles, il se penche sur l'étage final de modulation. Il y découvre un transistor de puissance qui a été remplacé par un modèle "équivalent" trouvé au marché local.

En consultant la fiche technique, il a une révélation. Le transistor d'origine avait des temps de commutation (t_r, t_f) de l'ordre de 50 nanosecondes. Le nouveau modèle, bien que supportant la même puissance, affiche des temps

supérieurs à 300 nanosecondes. Il est trop lent. Il n'arrive pas à suivre la vitesse du signal à moduler, ce qui déforme l'onde et produit le grésillement. Le problème n'était pas statique (puissance, tension), mais dynamique.

Exercice 1 : La surchauffe d'un montage LED à Matadi

Énoncé : Un finaliste de l'institut technique de Mvuzi, près de Matadi, conçoit un circuit pour faire clignoter une puissante LED. Son transistor de commutation, un 2N2222, commande un courant de saturation $I_{Csat} = 150\,\text{mA}$. La fiche technique du transistor indique une tension de saturation typique $V_{CEsat} = 0.4\,\text{V}$ pour ce courant. Calculez la puissance dissipée par le transistor lorsqu'il est à l'état "ON" (saturé).

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identification des données** On nous donne le courant de saturation I_{Csat} et la tension de saturation V_{CEsat}.
   - $I_{Csat} = 150\,\text{mA} = 0.15\,\text{A}$
   - $V_{CEsat} = 0.4\,\text{V}$
2. **Étape 2 : Application de la formule de puissance** La puissance dissipée (P_D) dans un composant est le produit de la tension à ses bornes par le courant qui le traverse. Pour le transistor saturé, la formule est :

$$P_D = V_{CEsat} \times I_{Csat}$$

3. **Étape 3 : Calcul numérique** On remplace les valeurs dans la formule.

$$P_D = 0.4\,\text{V} \times 0.15\,\text{A} = 0.06\,\text{W}$$

La puissance dissipée par le transistor est de 60 milliwatts. C'est cette puissance qui le fait chauffer, même lorsqu'il est censé être un interrupteur fermé parfait.

Exercice 2 : Fréquence limite d'un automate au Kasaï

Énoncé : Une ingénieure à Mbuji-Mayi doit programmer un automate pour piloter une électrovanne à très haute cadence. Le transistor de sortie de l'automate possède les caractéristiques dynamiques suivantes : $t_d = 20\,\text{ns}$, $t_r = 40\,\text{ns}$, $t_s = 150\,\text{ns}$, $t_f = 60\,\text{ns}$. Quelle est la fréquence de commutation maximale théorique que l'on peut atteindre avec ce transistor ?