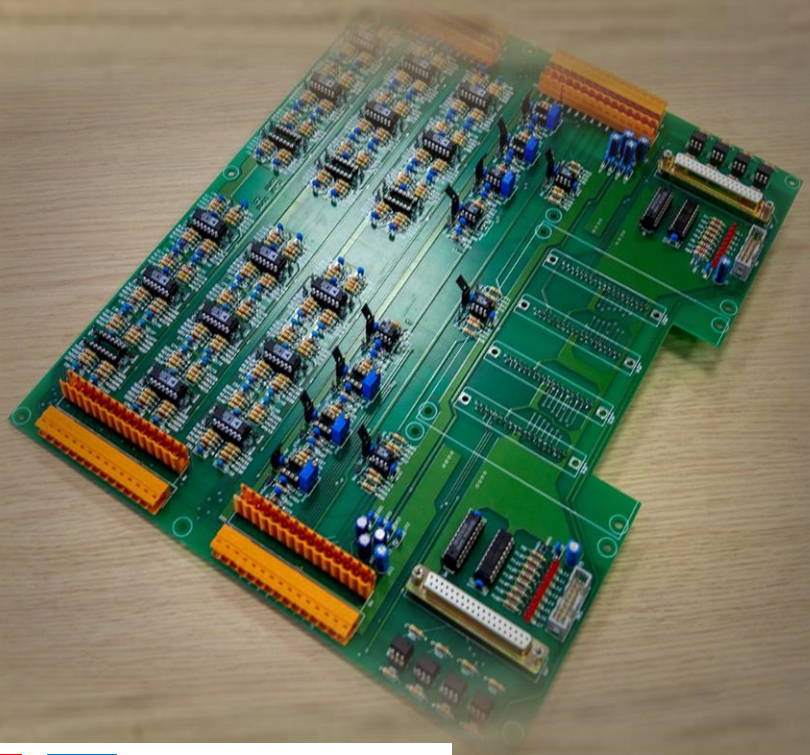


ELECTRONIQUE GENERALE

CONFORME AU PROGRAMME NATIONAL

4è Année

Option ÉLECTRONIQUE

EDITION 2025

TABLE DES MATIÈRES

PRÉLIMINAIRES **1**

1. Objectifs Généraux du Cours 1
   - 1.1. Consolidation et Systématisation des Acquis 1
   - 1.2. Maîtrise des Méthodologies d'Analyse 1
   - 1.3. Initiation à la Logique de Conception 1
   - 1.4. Développement de la Compétence Pratique et Diagnostique 1

2. Compétences Visées 2
   - 2.1. Maîtrise des savoirs fondamentaux 2
   - 2.2. Développement du savoir-faire méthodologique 2
   - 2.3. Acquisition des compétences de diagnostic et de conception 2

3. Approche Pédagogique 2
   - 3.1. Ancrage Conceptuel et Progressivité 2
   - 3.2. La Démonstration par l'Exemple 3
   - 3.3. Du Schéma à la Réalisation Pratique 3
   - 3.4. Finalité : L'Autonomie Opérationnelle 3

PARTIE 1. L'ANALYSE DES TRANSISTORS EN RÉGIME LINÉAIRE (PETITS SIGNAUX) **4**

La double vie du transistor 4

Le principe de superposition 4

La modélisation, ou l'art du remplacement 4

Les paramètres de performance 4

CHAPITRE 1. MODÉLISATION DU TRANSISTOR BIPOLAIRE EN PETITS SIGNAUX **5**

1.1. Le principe de la linéarisation autour du point de repos 5
   - a. La route droite et la route sinueuse 5
   - A. Le point de repos (ou de polarisation) 5
   - B. L'approximation linéaire autour du point de repos 5

FIGURE 1 : RÉF. IMG () **8**

Caractéristique du transistor, point de repos et approximation par la tangent 8
   - a. La courbe réelle (non-linéaire) 8
   - b. Le point de repos (P) 8
   - c. La tangente (approximation linéaire) 8
   - d. La zone de validité 8
   - C. Définition des paramètres petits signaux 8

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

1.2. Modèles en « pi » hybride (complet et simplifié) et calcul des paramètres.....10
- a. L'utilité d'un modèle simple.....10
- A. Le modèle complet de Giacoletto.....11

FIGURE 2 : RÉF. IMG ().....13

Schéma du modèle en pi hybride complet du transistor bipolaire.....13
- a. Anatomie du modèle.....13
- b. Le cœur du modèle : la source de courant.....13
- c. Les résistances internes.....13
- d. Les éléments pour hautes fréquences.....13
- B. Le modèle simplifié en basses fréquences.....13

FIGURE 3 : RÉF. IMG ().....16

Modèle en pi hybride simplifié pour les basses fréquences.....16
- a. Un schéma épuré.....16
- b. Calcul de la transconductance ().....16
- c. Calcul de la résistance d'entrée ().....16
- d. La résistance d'entrée totale.....16
- C. Scénarios et Exercices.....17

1.3. Le circuit équivalent universel (de Giacoletto).....18
- a. Le défi des hautes fréquences.....18
- A. Structure du modèle de Giacoletto.....19

FIGURE 4 : RÉF. IMG ().....21

Schéma du modèle de Giacoletto pour un transistor bipolaire NPN.....21
- a. Composants du circuit.....21
- b. Les capacités internes.....21
- c. Le point de base intrinsèque (b').....21
- d. La source de courant commandée.....21
- B. Paramètres fondamentaux du modèle.....21

FIGURE 5 : RÉF. IMG ().....24

Modèle de Giacoletto simplifié pour le calcul du gain en tension.....24
- a. Simplification du modèle.....24
- b. Le rôle de la transconductance ().....24
- c. La résistance.....24
- d. Limites de la simplification.....24
- b. Scénarios et Exercices.....24

CHAPITRE 2. LES TROIS MONTAGES FONDAMENTAUX DU TRANSISTOR BIPOLAIRE.....27

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

2.1. L'amplificateur à Émetteur Commun (EC).....27
- a. Le maillon fort de l'amplification.....27
- A. Principe de Fonctionnement.....27

FIGURE 6 : RÉF. IMG ().....29

Schéma de principe du montage amplificateur à Émetteur Commun (EC).....29
- a. Identification des bornes.....29
- b. Le chemin du signal.....29
- c. Le rôle de la polarisation.....29
- d. La sortie amplifiée.....29
- B. Caractéristiques Fondamentales.....29

FIGURE 7 : RÉF. IMG ().....32

Visualisation du déphasage de 180 degrés en montage Émetteur Commun.....32
- a. Le signal d'entrée ().....32
- b. Le signal de sortie ().....32
- c. La relation de phase.....32
- d. L'amplification visible.....32
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....32

2.2. L'amplificateur à Collecteur Commun (CC) ou « émetteur-suiveur ».....34
- a. Le suiveur fidèle.....34
- A. Structure et Principe.....35
- B. Caractéristiques Fondamentales.....35
- C. Rôle d'Adaptateur d'Impédance.....35
- Scénarios et Exercices.....36

2.3. L'amplificateur à Base Commune (BC).....37
- a. Le montage qui change les règles.....37
- A. Principe et Schéma de base.....38
- B. Caractéristiques fondamentales.....38
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....39

2.4. Synthèse comparative et justification du choix.....40
- a. Le choix de l'outil juste.....40
- A. Tableau comparatif des caractéristiques.....41
- B. Critères de sélection d'un montage.....41

FIGURE 8 : RÉF. IMG ().....43

Diagramme décisionnel pour choisir un montage de transistor bipolaire.....43
- a. Point de départ : Le besoin.....43
- b. Chemin 1 : Gain maximal en puissance.....43
- c. Chemin 2 : Adaptation d'impédance.....43

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- d. Chemin 3 : Hautes fréquences et courant....43
- C. Scénarios et exercices....43

CHAPITRE 3. MODÉLISATION ET ANALYSE DES TRANSISTORS À EFFET DE CHAMP (FET) 46

3.1. Le modèle en petits signaux du FET....46

- L'erreur du débutant et la sagesse de l'ingénieur....46
- A. Du composant réel au schéma équivalent....46

FIGURE 9 : RÉF. IMG ()....49

Schéma équivalent en petits signaux du transistor à effet de champ (FET)....49

- a. L'entrée : une porte ouverte....49
- b. Le cœur : une source de courant commandée....49
- c. La sortie : une résistance non idéale....49
- d. Synthèse du modèle....49
- B. L'importance capitale du point de polarisation....49

3.2. Les montages fondamentaux du FET : Source Commune et Drain Commun....52

- L'architecture du signal....52
- A. Le montage Source Commune (SC) : L'amplificateur de tension....52

FIGURE 10 : RÉF. IMG ()....54

Schéma de principe d'un amplificateur à transistor FET en montage Source Commune....54

- a. Identification des bornes....54
- b. Parcours du signal....54
- c. Le rôle de la polarisation....54
- d. L'inversion de phase....54
- B. Le montage Drain Commun (DC) : L'adaptateur d'impédance....54

FIGURE 11 : RÉF. IMG ()....57

Schéma de principe d'un étage suiveur en montage Drain Commun (Source Follower)....57

- a. Connexions spécifiques....57
- b. La fonction "suiveur"....57
- c. Adaptation d'impédance....57
- d. Absence d'amplification en tension....57
- L'écho de la guitare de Papa Wemba....57

3.3. Justification des performances et bilan de puissance....59

- a. L'amplificateur qui chauffe trop....59
- A. Le bilan des puissances : une affaire d'équilibre....59

FIGURE 12 : RÉF. IMG ()....62

Diagramme de flux des puissances dans un transistor FET....62

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- a. La source d'énergie....62
- b. Le transistor en action....62
- c. La puissance utile....62
- d. La chaleur dissipée....62
- B. Le rendement : le juge de la performance....62

FIGURE 13 : RÉF. IMG ()....65

Droite de charge d'un transistor FET et point de repos....65

- a. Le point de repos (Q)....65
- b. Influence sur le rendement....65
- c. Cas d'un point mal positionné....65
- d. Le compromis final....65
- b. Scénarios et Exercices....65

CHAPITRE 4. LE COMPORTEMENT EN FRÉQUENCE DES AMPLIFICATEURS....68

4.1. Les paramètres admitances (y) pour l'analyse HF....68

- a. L'obsolescence du modèle basse fréquence....68
- A. Définition du quadripôle en paramètres y....68
- B. Intérêt des paramètres y en haute fréquence....69
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....69

4.2. Influence des capacités parasites....71

- a. Le fardeau de la vitesse....71
- A. Origine physique des capacités parasites....72

FIGURE 14 : RÉF. IMG ()....74

Modèle haute fréquence du transistor bipolaire avec capacités parasites internes....74

- a. L'anatomie du transistor....74
- b. La capacité base-émetteur ()....74
- c. La capacité base-collecteur ()....74
- d. Le modèle équivalent....74
- B. Conséquences sur le gain en tension....74

4.3. Fréquences de coupure et produit gain-bande passante....77

- a. Le royaume de l'amplificateur....77
- A. Définition des fréquences de coupure ()....77
- B. Le Produit Gain-Bande Passante (PGB)....78
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....78

4.4. Stabilité en haute fréquence : Unilatéralisation et Neutrodynation....79

- a. Le sifflement indésirable....79
- A. La source du mal : L'effet Miller....80
- B. Le remède : Unilatéralisation et Neutrodynation....80

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

FIGURE 15 : RÉF. IMG () **83**

Schéma d'un amplificateur avec son circuit de neutrodynation externe 83

- a. Composants clés 83
- b. Le chemin parasite interne 83
- c. Le chemin de correction externe 83
- d. L'objectif : L'annulation 83
- Anecdote : Le relais radio de Mbuji-Mayi 83

PARTIE 2. LES AMPLIFICATEURS DE TENSION ET DE PUISSANCE **86**

a. Du signal faible au signal fort 86

b. Tension et Puissance : deux objectifs distincts 86

c. Le transistor : cœur du réacteur 86

d. Le défi : fidélité et rendement 86

CHAPITRE 5. LE PRÉAMPLIFICATEUR DE TENSION À UN ÉTAGE **87**

5.1. Principe de l'amplification et rôle des composants du préamplificateur 87

- a. L'écho amplifié 87
- A. Le principe : amplifier sans déformer 87
- B. Le rôle chirurgical des composants 87

FIGURE 16 : RÉF. IMG () **90**

Schéma type d'un préamplificateur à transistor en émetteur commun 90

- a. L'entrée du signal 90
- b. Le cœur actif : transistor et polarisation 90
- c. La création de l'amplification 90
- d. La sortie du signal 90
- C. Scénarios et Exercices 90

5.2. Influence de la résistance d'émetteur (Re) 92

- a. Le principe de la bride 92
- A. Stabilisation du point de repos 92
- B. Effet sur le gain en tension () 93
- C. Scénarios et Exercices 93

5.3. Droite de charge dynamique et excursion du signal 95

- a. Le repos et le mouvement 95
- A. De la droite de charge statique à la droite dynamique 95
- B. Excursion du signal et limites de l'amplification 96

FIGURE 17 : RÉF. IMG () **98**

Droites de charge statique et dynamique sur les caractéristiques du transistor 98

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- a. Le point de repos (Q)....98
- b. La droite de charge statique....98
- c. La droite de charge dynamique....98
- d. L'excursion du signal....98
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....98

CHAPITRE 6. LES AMPLIFICATEURS DE PUISSANCE : CLASSES DE FONCTIONNEMENT..101

6.1. Spécificités des amplificateurs de puissance : commande et contraintes....101
- a. De la voix du chef au haut-parleur....101
- A. Distinction fondamentale : tension versus puissance....101
- B. La contrainte thermique et la notion de rendement....101

FIGURE 18 : RÉF. IMG ()....104

Transistor de puissance monté sur son radiateur en aluminium....104
- a. Le composant actif....104
- b. Le dissipateur thermique (radiateur)....104
- c. L'interface thermique....104
- d. La fixation mécanique....104
- Anecdote : Le son de la rumba à Matadi....104

6.2. Classification des amplificateurs (Classes A, B, AB, C)....106
- a. Le compromis de l'amplificateur....106
- A. La Classe A : Le marathonien fidèle....106
- B. La Classe B : Le duo efficace....106
- C. Les Classes AB et C : Les solutions hybrides....107

6.3. Dissipation thermique et refroidisseurs....109
- a. L'inévitable chaleur des composants....109
- A. La puissance dissipée () et la température de jonction ()....109
- B. La résistance thermique ()....109
- C. Le rôle du refroidisseur (dissipateur)....110

FIGURE 19 : RÉF. IMG ()....112

Structure typique d'un transistor de puissance monté sur un refroidisseur....112
- a. Le transistor....112
- b. L'interface de contact....112
- c. Le refroidisseur à ailettes....112
- d. Le chemin du flux de chaleur....112
- D. Calcul du refroidisseur adapté....112

CHAPITRE 7. L'AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE EN CLASSE A....115

7.1. Le point de repos en classe A....115

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- a. Le ralenti de l'électronique....115
- A. Définition du point de repos (Point Q)....115
- B. Le centrage : une exigence de la classe A....115

FIGURE 20 : RÉF. IMG ()....117

Droite de charge statique d'un transistor avec point de repos centré....117

- a. La droite de charge....117
- b. Le point de repos (Q)....117
- c. Les zones de distorsion....117
- d. L'excursion du signal....117
- C. Scénarios et Exercices....117

7.2. Bilan de puissance et rendement....119

- a. L'énergie, une ressource précieuse....119
- A. Les trois puissances clés du bilan....119

FIGURE 21 : RÉF. IMG ()....122

Diagramme des flux de puissance dans un amplificateur de classe A....122

- a. La source d'énergie ()....122
- b. Le transistor, un convertisseur imparfait....122
- c. La puissance utile ()....122
- d. L'équation de conservation....122
- B. Le rendement : une mesure d'efficacité....122

FIGURE 22 : RÉF. IMG ()....125

Visualisation du rendement maximal théorique de 25% en classe A....125

- a. La puissance totale consommée....125
- b. La part de la chaleur (dissipation)....125
- c. La petite part utile (son)....125
- d. Le gaspillage structurel....125
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....125

7.3. Classe A avec transformateur de sortie....127

- a. L'art de l'adaptation....127
- A. Principe de fonctionnement et avantages....128
- B. Adaptation d'impédance et calcul du rendement....128

7.4. Avantages et inconvénients....130

- a. Le paradoxe de la fidélité....130
- A. L'avantage principal : une faible distorsion....131
- B. L'inconvénient majeur : un rendement médiocre....131

FIGURE 23 : RÉF. IMG ()....133

Point de repos et amplification sans distorsion en Classe A.....133
- a. Le point de repos (Q).....133
- b. L'excursion du signal.....133
- c. La forme d'onde de sortie.....133
- d. La dissipation thermique.....133
- b. Scénarios et Exercices.....133

CHAPITRE 8. L'AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE PUSH-PULL (CLASSES B ET AB).....136

8.1. Le principe du montage Push-Pull.....136
- a. Le travail d'équipe en électronique.....136
- A. Le fonctionnement en Classe B : la division du travail.....136

FIGURE 24 : RÉF. IMG ().....138

Schéma de principe d'un amplificateur Push-Pull de classe B.....138
- a. Analyse du circuit.....138
- b. Rôle du transistor NPN (Q1).....138
- c. Rôle du transistor PNP (Q2).....138
- d. La zone de croisement.....138
- B. La distorsion de croisement et la migration vers la Classe AB.....138

FIGURE 25 : RÉF. IMG ().....141

Comparaison des signaux de sortie avec et sans distorsion de croisement.....141
- a. Signal de sortie en Classe B.....141
- b. Le "plat" de la distorsion.....141
- c. Signal de sortie en Classe AB.....141
- d. L'efficacité de la polarisation.....141
- C. Scénarios et Exercices.....141

8.2. La distorsion de croisement.....143
- a. L'erreur de l'interrupteur parfait.....143
- A. L'anatomie d'une déformation.....143
- B. La solution : la polarisation de repos (Classe AB).....144
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....144

8.3. Le passage en classe AB et les étages « drivers ».....146
- a. L'analogie du passage de témoin.....146
- A. La solution classe AB : vaincre la distorsion de croisement.....146

FIGURE 26 : RÉF. IMG ().....148

Schéma d'un amplificateur Push-Pull Classe AB avec polarisation par diodes.....148
- a. Anatomie du circuit.....148
- b. Le rôle des diodes polarisantes.....148

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- c. Polarisation des transistors.....148
- d. Le courant de repos ().....148
- B. L'étage pilote ou "driver".....148
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....149

8.4. Bilan de puissance et rendement de la classe B.....151
- a. L'obsession du rendement.....151
- A. Puissance fournie par l'alimentation ().....151
- B. Puissance utile et puissance dissipée (et).....152
- C. Le rendement théorique maximal ().....153

PARTIE 3. LA RÉACTION ET SES APPLICATIONS : OSCILLATEURS.....156

a. Le principe de la réaction.....156

b. La condition du départ : le critère de Barkhausen.....156

c. Une famille de circuits : les oscillateurs LC et RC.....156

d. L'horloge du monde moderne : des applications concrètes.....156

CHAPITRE 9. LA CONTRE-RÉACTION (RÉACTION NÉGATIVE) ET SES EFFETS.....157

9.1. Définition et schéma de principe.....157
- a. La logique de la correction permanente.....157
- A. Principe général et expression du gain.....157

FIGURE 27 : RÉF. IMG ().....160

Schéma bloc d'un système amplificateur avec boucle de contre-réaction négative.....160
- a. Le sommateur d'entrée.....160
- b. L'amplificateur de base.....160
- c. Le point de prélèvement et la chaîne de retour.....160
- d. La boucle fermée.....160
- B. Les quatre configurations fondamentales.....160
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....161

9.2. Propriétés de la contre-réaction.....163
- a. Le sacrifice apparent.....163
- A. Stabilisation du Gain et Réduction de la Distorsion.....163
- B. Modification de la Bande Passante.....163

FIGURE 28 : RÉF. IMG (3665-6830-0242).....164

Comparaison de la bande passante avec et sans contre-réaction.....164
- a. L'amplificateur en boucle ouverte.....164
- b. L'amplificateur avec contre-réaction.....164
- c. Le point de coupure étendu.....164

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- d. Le compromis fondamental....164
- C. Contrôle des Impédances d'Entrée et de Sortie....164

9.3. Les quatre types de contre-réaction....166

- a. Une question de prélèvement et d'injection....166
- A. Contre-réaction Série-Parallèle (Tension-Série)....166
- B. Contre-réaction Parallèle-Série (Courant-Parallèle)....167

FIGURE 29 : RÉF. IMG ()....169

Schéma de principe des contre-réactions Série-Parallèle et Parallèle-Série....169

- a. Analyse Visuelle....169
- b. Le prélèvement de sortie....169
- c. L'injection d'entrée....169
- d. L'impact sur les impédances....169
- C. Contre-réaction Série-Série (Courant-Série)....169
- D. Contre-réaction Parallèle-Parallèle (Tension-Parallèle)....170

FIGURE 30 : RÉF. IMG ()....172

Topologies de contre-réaction Série-Série et Parallèle-Parallèle....172

- a. Analyse Visuelle....172
- b. La configuration Série-Série....172
- c. La configuration Parallèle-Parallèle....172
- d. Choix de la topologie....172
- Anecdote : Le micro de la chorale de Boma....172

9.4. Analyse d'un montage à contre-réaction....174

- a. L'écho qui discipline le son....174
- A. La Méthode de Blackman : L'outil du chirurgien....174

FIGURE 31 : RÉF. IMG (9994-4505-5155)....176

Schéma bloc d'un système à contre-réaction générique....176

- a. L'amplificateur de base (A)....176
- b. La chaîne de retour (β)....176
- c. Le sommateur d'entrée....176
- d. Le signal de sortie final (Vs)....176
- B. Les Quatre Topologies de Contre-Réaction....176

FIGURE 32 : RÉF. IMG ()....178

Les quatre configurations fondamentales de la contre-réaction....178

- a. Topologie Série-Shunt (Tension-Tension)....178
- b. Topologie Shunt-Série (Courant-Courant)....178
- c. Topologie Série-Série (Courant-Tension)....178

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- d. Topologie Shunt-Shunt (Tension-Courant)....178
- Une radio à pannes mystérieuses à Lisala....178

CHAPITRE 10. LE PRINCIPE DES OSCILLATEURS ET LA CONDITION DE BARKHAUSEN. .181

10.1. Principe de l'oscillation : de l'amplification à la réaction positive....181
- a. D'un phénomène parasite à un outil fondamental....181
- A. La boucle de réaction : le dialogue interne du circuit....181

FIGURE 33 : RÉF. IMG ()....183

Schéma fonctionnel d'un système à réaction positive pour créer l'oscillation....183
- a. L'amplificateur (Gain A)....183
- b. Le réseau de réaction (Fonction β)....183
- c. Le point de sommation....183
- d. La sortie (Vs)....183
- B. La condition de Barkhausen : la recette de l'oscillation....183
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....184

10.2. La condition de Barkhausen....186
- a. La naissance d'une condition fondamentale....186
- A. La condition d'amplitude : le moteur de l'oscillation....186
- B. La condition de phase : le synchronisme parfait....187

FIGURE 34 : RÉF. IMG (2518-6146-1037)....188

Schéma bloc d'un oscillateur avec sa boucle de rétroaction et ses gains....188
- a. Le bloc amplificateur ()....188
- b. Le réseau de réaction ()....188
- c. Le point de sommation....188
- d. La boucle fermée....188
- L'anecdote de l'écho de la Lomami....188

10.3. Stabilisation de l'amplitude....190
- a. Un défi vieux de plusieurs siècles....190
- A. Le dilemme de la condition de Barkhausen....190
- B. Les solutions de limitation non-linéaire....191

CHAPITRE 11. LES OSCILLATEURS SINUSOÏDAUX RC ET LC....194

11.1. Les oscillateurs à réseau déphaseur (RC)....194
- a. L'horloge primitive et l'horloge électronique....194
- A. Principe de fonctionnement....194
- B. Le réseau déphaseur à trois cellules RC....194

FIGURE 35 : RÉF. IMG ()....196

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Schéma de principe d'un oscillateur RC avec amplificateur opérationnel....196
- a. L'amplificateur inverseur....196
- b. La boucle de réaction....196
- c. Le réseau déphaseur RC....196
- d. La condition de gain....196
- C. Conditions d'oscillation....196

FIGURE 36 : RÉF. IMG ()....199

Courbes de réponse du réseau RC : déphasage et atténuation....199
- a. L'axe de la fréquence....199
- b. Courbe de déphasage (φ)....199
- c. Courbe d'atténuation (A)....199
- d. Le point d'oscillation....199
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....199

11.2. L'oscillateur à pont de Wien....201
- a. Une naissance prestigieuse....201
- A. Principe de fonctionnement....202
- B. Analyse des conditions d'oscillation....202
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....203

11.3. Les oscillateurs à circuit résonant (LC)....204
- a. Le balancier de l'électronique....204
- A. Le principe du circuit bouchon (LC parallèle)....205
- B. La condition d'entretien : la réaction....205
- C. Les montages classiques : Hartley et Colpitts....206

11.4. L'oscillateur à quartz....208
- a. La précision venue d'une pierre....208
- A. Effet piézoélectrique et modèle équivalent....208

FIGURE 37 : RÉF. IMG ()....210

Modèle électrique équivalent d'un cristal de quartz et sa réponse fréquentielle....210
- a. Le symbole schématique....210
- b. Le circuit équivalent....210
- c. Les fréquences de résonance....210
- d. La zone d'oscillation....210
- B. L'oscillateur de Pierce....211

PARTIE 4. LES CIRCUITS D'ALIMENTATION ÉLECTRONIQUE DE PRÉCISION....213

L'impératif énergétique....213

Au-delà du pont de diodes....213

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

L'avènement de la régulation.....213

Applications critiques et enjeux de précision.....213

CHAPITRE 12. LES ALIMENTATIONS STABILISÉES À TRANSISTOR.....214

12.1. Nécessité et efficacité de la stabilisation.....214

- a. Le défi de la tension constante.....214
- A. Les deux sources d'instabilité.....214
- B. Le principe de la stabilisation par transistor.....214

12.2. Le régulateur « série ».....217

- a. Le principe du sacrifice contrôlé.....217
- A. Architecture et fonctionnement.....217

FIGURE 38 : RÉF. IMG ().....219

Schéma de principe d'un régulateur de tension série à transistor NPN.....219

- a. L'élément de contrôle.....219
- b. La référence de tension.....219
- c. La boucle de régulation implicite.....219
- d. Limitations du montage.....219
- B. Équations fondamentales et dimensionnement.....219
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....220

12.3. Le régulateur « parallèle » (shunt).....222

- a. La dérivation comme stratégie.....222
- A. Principe de fonctionnement.....222
- B. Le régulateur à transistor.....222

FIGURE 39 : RÉF. IMG ().....224

Schéma d'un régulateur shunt à transistor et sa diode Zener.....224

- a. L'entrée et la résistance série.....224
- b. L'étage de régulation parallèle.....224
- c. La référence de tension.....224
- d. La charge.....224
- C. Calculs essentiels.....224

12.4. Dimensionnement et calcul des éléments.....227

- a. L'ingénierie contre le hasard.....227
- A. Calcul de la résistance Zener ().....227

FIGURE 40 : RÉF. IMG (4058-5955-6340).....228

Schéma de principe d'une alimentation stabilisée série à transistor NPN.....228

- a. L'étage d'entrée.....228
- b. La référence de tension.....228

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- c. L'élément de contrôle....228
- d. La sortie régulée....228
- B. Choix du transistor de puissance ()....228

FIGURE 41 : RÉF. IMG ()....231

Zone de fonctionnement sécurisée (SOA) d'un transistor de puissance....231

- a. Axes de la SOA....231
- b. Limite en courant (1)....231
- c. Limite en puissance (2)....231
- d. Limite en tension (3)....231
- C. Vérification de la puissance dissipée....231
- Scénarios et Exercices....232

CHAPITRE 13. LES DISPOSITIFS DE LIMITATION DE COURANT....234

13.1. Principe et mise en œuvre de la limitation de courant simple....234

- a. Le paradoxe de la protection....234
- A. Le Gardien du Courant : Le Transistor en Sentinelle....234

FIGURE 42 : RÉF. IMG (2997-2794-7066)....235

Schéma de la limitation de courant simple avec transistor et résistance....235

- a. Identification des composants clés....235
- b. Flux du courant de charge ()....235
- c. Boucle de détection....235
- d. Mécanisme de régulation....235
- B. Calcul et Dimensionnement du Seuil de Limitation....235
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....236

13.2. La limitation de courant à caractéristique de retour (« foldback »)....238

- a. L'intelligence de la protection....238
- A. Principe de fonctionnement....238

FIGURE 43 : RÉF. IMG (1220-4713-3983)....240

Schéma de principe d'une alimentation avec limitation de courant foldback....240

- a. Les composants de la décision....240
- b. Régime normal : la surveillance discrète....240
- c. Surcharge détectée : l'intervention....240
- d. Le mécanisme de retour : la sécurité renforcée....240
- B. Avantages et inconvénients....240

13.3. Intégration dans le schéma de l'alimentation....242

- a. Le rôle du protecteur silencieux....242
- A. Positionnement stratégique du circuit limiteur....243

FIGURE 44 : RÉF. IMG () **245**

Schéma d'alimentation avec circuit de limitation de courant intégré 245

- a. Zone de redressement et filtrage 245
- b. Le bloc de limitation (le gardien) 245
- c. Le régulateur et la charge 245
- d. Le seuil de déclenchement 245
- B. Interaction avec le régulateur de tension 245

CHAPITRE 14. INTRODUCTION AUX RÉGULATEURS DE TENSION INTÉGRÉS **249**

14.1. Le principe du régulateur intégré 249

- a. Le besoin de discipline électrique 249
- A. Le concept du circuit intégré "tout-en-un" 249
- B. Structure interne et fonctionnement en boucle fermée 249

FIGURE 45 : RÉF. IMG () **252**

Schéma bloc simplifié d'un régulateur de tension de type série 252

- a. La référence de tension 252
- b. L'amplificateur d'erreur 252
- c. L'élément de contrôle (Transistor série) 252
- d. Le pont diviseur de sortie 252
- SCÉNARIOS ET EXERCICES 252

14.2. Les régulateurs de tension fixes 254

- a. La promesse de la stabilité 254
- A. La famille 78xx / 79xx : une nomenclature claire 255

FIGURE 46 : RÉF. IMG () **257**

Brochage standard d'un régulateur 78xx en boîtier TO-220 257

- a. Identification des broches 257
- b. Le rôle du dissipateur thermique 257
- c. Connexion à la masse (GND) 257
- d. Simplicité du montage 257
- B. Le montage de base et les condensateurs de découplage 257

14.3. Les régulateurs de tension ajustables 260

- a. Le besoin de flexibilité 260
- A. Le principe de la rétroaction par pont diviseur 260
- B. L'exemple du LM317 260

FIGURE 47 : RÉF. IMG (9899-8655-4333) **262**

Schéma de base d'un régulateur ajustable LM317 avec son pont diviseur 262

- a. Les trois broches 262

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- b. Le pont diviseur de tension....262
- c. Les condensateurs de découplage....262
- d. Le chemin du courant d'ajustement....262
- Anecdotes et cas pratiques....262

14.4. Conception d'une alimentation de laboratoire....264
- a. L'ambition du technicien....264
- A. Le schéma synoptique : la colonne vertébrale du projet....264

FIGURE 48 : RÉF. IMG ()....267

Schéma synoptique d'une alimentation de laboratoire régulée et stabilisée....267
- a. Du secteur à la basse tension....267
- b. De l'alternatif au pulsé....267
- c. Du pulsé au continu brut....267
- d. Du brut au stable....267
- B. Le choix des composants : la phase critique....267

ANNEXES....271

1. Mémento des Formules de l'Amplification....271
- A. Définitions des Gains....271
- B. Impédances Caractéristiques....272
- C. Modèle Petit Signal du Transistor Bipolaire (BJT)....273
- D. Modèle Petit Signal du Transistor à Effet de Champ (MOSFET)....274

2. Guide de Sélection d'un Dissipateur Thermique....275
- A. Principes Fondamentaux du Transfert Thermique....275
- B. Calcul de la Résistance Thermique Requise....276
- C. Caractéristiques Physiques et Typologies....277
- D. Optimisation de l'Interface et du Montage....278

3. Tableaux Comparatifs des Classes d'Amplificateurs....278
- A. Principes de Classification....278
- B. Analyse détaillée des Classes....279
- C. Tableau Synthétique....281

4. Catalogue de Schémas d'Oscillateurs....281
- A. Oscillateurs LC....281
- B. Oscillateurs RC....284
- C. Oscillateurs à Quartz....285

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

PRÉLIMINAIRES

1. Objectifs Généraux du Cours

1.1. Consolidation et Systématisation des Acquis

La finalité première de ce programme est la systématisation des connaissances acquises durant les années antérieures. Il s'agit d'ancrer durablement la maîtrise des lois fondamentales de l'électricité, des composants passifs et des principes des semi-conducteurs. Une compréhension approfondie de ces prérequis conditionne l'accès aux concepts avancés du cursus.

1.2. Maîtrise des Méthodologies d'Analyse

Au-delà de la simple identification des composants, la formation vise le développement d'une compétence analytique rigoureuse. L'élève doit pouvoir décomposer un circuit complexe en sous-systèmes fonctionnels, appliquer les théorèmes fondamentaux (Thévenin, Norton, superposition) et modéliser le comportement des circuits en régimes continu, sinusoïdal et impulsionnel.

1.3. Initiation à la Logique de Conception

Progressivement, la démarche analytique cède la place à la logique de synthèse. L'objectif est de former l'élève à traduire un cahier des charges fonctionnel simple en un schéma électronique cohérent. Cette compétence implique le choix judicieux des composants et l'agencement des fonctions élémentaires (amplification, filtrage, commutation) pour obtenir un résultat spécifié.

1.4. Développement de la Compétence Pratique et Diagnostique

L'enseignement théorique est indissociable de sa validation expérimentale. Un objectif terminal est la capacité à instrumenter un montage, à en mesurer les grandeurs caractéristiques et à interpréter les écarts entre résultats théoriques et pratiques. Cette compétence culmine dans l'aptitude au diagnostic de panne, essentielle en vue de l'Examen d'État.

---

2. Compétences Visées

2.1. Maîtrise des savoirs fondamentaux

Au terme de ce programme, l'élève doit démontrer une compréhension approfondie des principes régissant les systèmes électroniques analogiques et numériques. Ceci inclut la maîtrise des quadripôles, des filtres actifs, des amplificateurs opérationnels en régimes linéaire et non linéaire, ainsi que des circuits logiques séquentiels et des mémoires. La compétence visée est la capacité à mobiliser ces connaissances pour analyser le fonctionnement d'un circuit complexe.

2.2. Développement du savoir-faire méthodologique

Au-delà de la théorie, le manuel vise à structurer la démarche pratique de l'électronicien. L'élève doit acquérir une autonomie dans la lecture de schémas techniques, l'interprétation des fiches de données (datasheets) et l'utilisation correcte de l'instrumentation de mesure (oscilloscope, multimètre, générateur de fonctions). Il s'agit de cultiver la rigueur dans le montage, le câblage et la validation fonctionnelle d'un prototype.

2.3. Acquisition des compétences de diagnostic et de conception

Finalement, le cursus prépare l'élève à une pensée de résolution de problèmes. Face à un système défaillant, il doit être capable de mettre en œuvre une stratégie de dépannage logique pour isoler et identifier une panne. Le programme l'initie également à la conception, le rendant apte à traduire un cahier des charges simple en un schéma électronique fonctionnel, en sélectionnant les composants appropriés pour répondre à une problématique concrète.

---

3. Approche Pédagogique

3.1. Ancrage Conceptuel et Progressivité

Chaque chapitre s'articule autour d'un noyau théorique fondamental et délimité. L'acquisition des savoirs est structurée de manière incrémentale, des principes généraux vers les applications spécifiques. Les concepts sont introduits séquentiellement pour garantir une maîtrise solide des prérequis avant d'aborder des montages plus élaborés. Cette architecture prévient la surcharge cognitive et favorise une construction durable des compétences.

3.2. La Démonstration par l'Exemple

Toute notion théorique est immédiatement suivie de son application concrète. Une loi ou un théorème est systématiquement illustré par un exemple chiffré et un schéma de principe. Cette méthode ancre la formule abstraite dans une réalité tangible et mesurable, facilitant ainsi sa compréhension profonde. Le calcul littéral est toujours complété par une application numérique, transformant la connaissance déclarative en connaissance procédurale.

3.3. Du Schéma à la Réalisation Pratique

Dépassant la simple analyse de circuits, la démarche pédagogique valorise la transition du diagramme schématique vers le problème pratique. Les exercices sont conçus pour simuler des situations de dépannage ou de conception réelles. L'objectif est de préparer l'élève à interpréter un besoin, à le traduire en schéma, puis à envisager sa mise en œuvre matérielle.

3.4. Finalité : L'Autonomie Opérationnelle

L'ensemble de cette démarche vise une compétence clé : l'autonomie de l'électronicien. Au terme du cursus, l'élève doit être capable de diagnostiquer une panne, de valider un montage et de proposer une modification de manière raisonnée. Il s'agit de former un technicien apte à mobiliser ses connaissances pour résoudre des problèmes inédits, une aptitude fondamentale pour la réussite à l'Examen d'État et l'insertion professionnelle.

Partie 1. L'ANALYSE DES TRANSISTORS EN RÉGIME LINÉAIRE (PETITS SIGNAUX)

La double vie du transistor

Un transistor possède une double vie. Il agit en commutateur ou en amplificateur. L'analyse en courant continu (DC) fixe son point de polarisation, son "point de repos". Cette étude statique, bien que fondamentale, reste silencieuse sur sa capacité à amplifier une information. Elle décrit un état stable, une photographie. Or, l'électronique vit de mouvement, de variations.

Le principe de superposition

Le régime "petits signaux" s'intéresse précisément à ces variations. Un signal alternatif de faible amplitude, comme un son capté par un micro à Mbandaka, se superpose à la tension de polarisation continue. L'idée centrale est simple. Pour de très faibles variations autour du point de repos, le comportement complexe du transistor peut être approximé par une fonction linéaire.

La modélisation, ou l'art du remplacement

Cette linéarisation autorise une simplification radicale. Pour l'analyse du signal alternatif, le transistor est remplacé par son "schéma équivalent". Ce modèle est un circuit simple, composé uniquement d'éléments linéaires : résistances, et sources de courant ou de tension commandées. Les sources de tension continues, elles, sont considérées comme des courts-circuits pour le signal. La complexité disparaît au profit de l'efficacité analytique.

Les paramètres de performance

L'objectif de cette analyse est pragmatique. Il s'agit de calculer les trois caractéristiques essentielles d'un étage amplificateur. Premièrement, le gain en tension et en courant. Deuxièmement, l'impédance d'entrée. Troisièmement, l'impédance de sortie. Ces trois valeurs décident de la performance d'un préampli, que ce soit à Lubumbashi ou au fin fond du Kwilu.

Chapitre 1. MODÉLISATION DU TRANSISTOR BIPOLAIRE EN PETITS SIGNAUX

1.1. Le principe de la linéarisation autour du point de repos

a. La route droite et la route sinueuse

Un des faits les plus contre-intuitifs en électronique est qu'un composant fondamentalement non-linéaire, le transistor, peut être traité comme un composant linéaire. Cette simplification est le cœur de l'analyse en petits signaux. Une caractéristique complexe est difficile à manipuler mathématiquement avec les outils de l'analyse des circuits linéaires.

L'astuce consiste à ne considérer qu'une portion minuscule de son fonctionnement. Sur une très courte distance, même la route la plus sinueuse du Kongo Central semble droite. La linéarisation applique ce principe au comportement électrique du transistor. On remplace alors une courbe par une droite locale, bien plus simple à étudier.

A. Le point de repos (ou de polarisation)

Un transistor, pour amplifier, doit d'abord être alimenté en courant continu. Ce réglage initial fixe un point de fonctionnement stable. On l'appelle le point de repos ou point de polarisation. Il assure que le transistor est dans sa zone de travail active, prêt à fonctionner correctement.

Ce point est défini par des grandeurs continues : - Le courant de collecteur de repos I_{C0}. - La tension collecteur-émetteur de repos V_{CE0}.

Autour de ce point, le composant est prêt à traiter un signal variable, dit "petit signal". Sans une polarisation correcte, toute amplification est impossible ou sera fortement déformée. Le point de repos est la fondation sur laquelle l'amplification est construite.

B. L'approximation linéaire autour du point de repos

Le signal à amplifier est une petite variation alternative superposée aux tensions et courants de repos. La tension base-émetteur totale devient $v_{BE}(t)=V_{BE0}+v_{be}(t)$. Le courant collecteur total devient $i_C(t)=I_{C0}+i_c(t)$.

La relation qui lie le courant de collecteur i_C à la tension base-émetteur v_{BE} est de nature exponentielle, donc non-linéaire. Cependant, pour de très

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

faibles variations ($v_{be}(t)$), la courbe exponentielle peut être approximée par sa tangente au point de repos $P(V_{BE0}, I_{C0})$.

Cette tangente est une droite. Son comportement est linéaire. On peut donc écrire une relation simple entre la petite variation du courant de sortie $i_c(t)$ et la petite variation de la tension d'entrée $v_{be}(t)$.

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Figure 1 : Réf. IMG (7896-1874-1977) Caractéristique du transistor, point de repos et approximation par la tangente linéaire

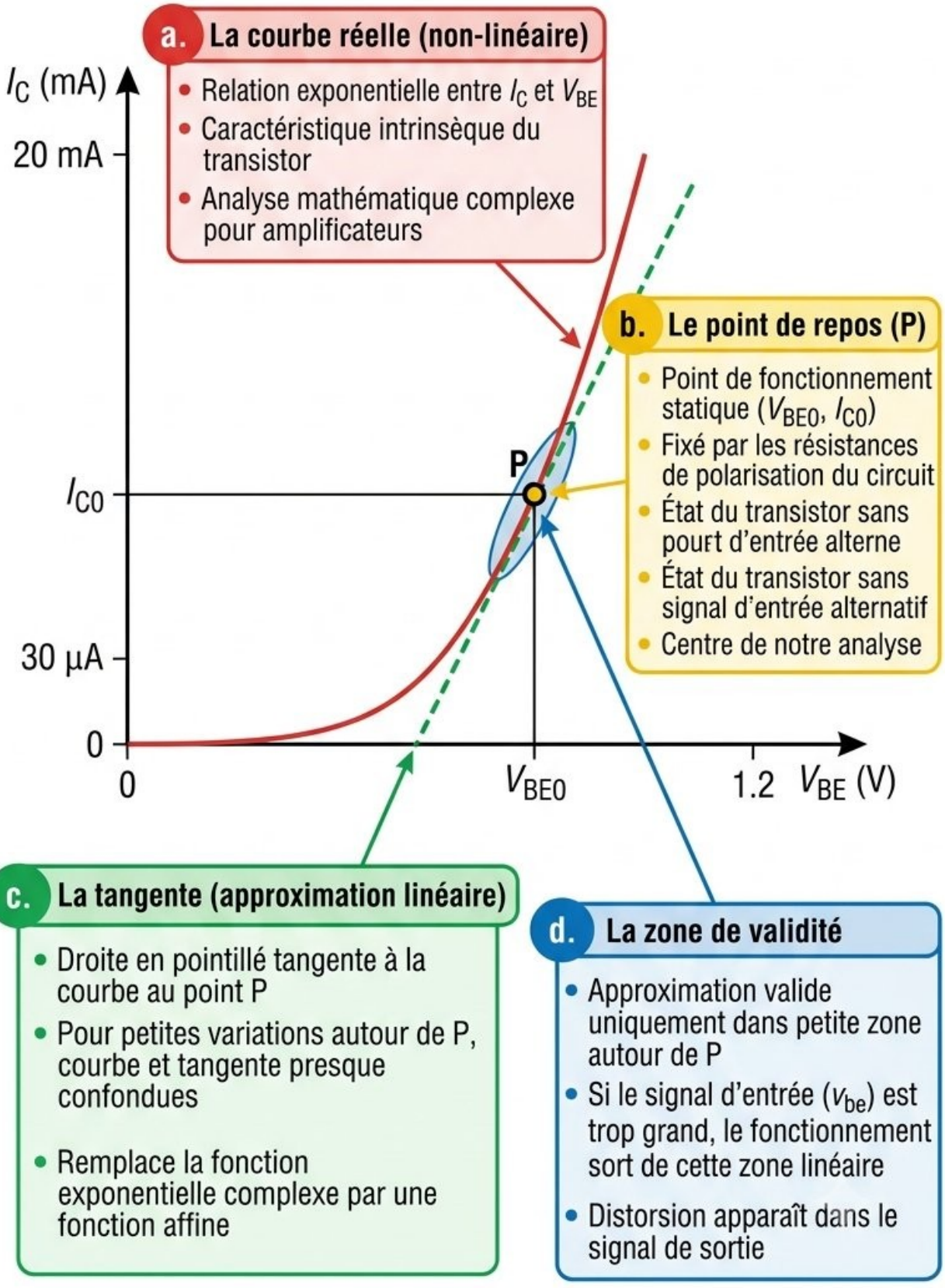


Figure 1 : Réf. IMG ()

Caractéristique du transistor, point de repos et approximation par la tangente linéaire

a. La courbe réelle (non-linéaire)

Le graphique montre la relation exponentielle entre le courant de collecteur I_C et la tension base-émetteur V_{BE}. Cette courbe est la caractéristique intrinsèque du transistor. Son analyse mathématique directe est complexe pour des circuits amplificateurs.

b. Le point de repos (P)

Le point P, de coordonnées (V_{BE0}, I_{C0}), est le point de fonctionnement statique. Il est fixé par les résistances de polarisation du circuit. Il représente l'état du transistor en l'absence de signal d'entrée alternatif. C'est le centre de notre analyse.

c. La tangente (approximation linéaire)

La droite en pointillé est la tangente à la courbe au point P. Pour de petites variations autour de P, la courbe et sa tangente sont presque confondues. On remplace donc la fonction exponentielle complexe par cette simple fonction affine.

d. La zone de validité

Cette approximation n'est valide que dans une petite zone autour de P. Si le signal d'entrée (v_{be}) est trop grand, le fonctionnement sort de cette zone linéaire et une distorsion apparaît dans le signal de sortie.

C. Définition des paramètres petits signaux

L'approximation linéaire fait apparaître des paramètres qui décrivent le comportement du transistor pour les petits signaux. Ces paramètres dépendent directement du point de repos, car la pente de la tangente change avec le point P.

La transconductance g_m lie la variation du courant de sortie à la variation de la tension d'entrée : $i_c = g_m \cdot v_{be}$. Sa valeur est :

$$g_m = \frac{I_{C0}}{V_T}$$

Ici, V_T est la tension thermique, valant environ 25 mV à température ambiante (300K).

La résistance d'entrée dynamique r_π lie la variation du courant de base à la variation de la tension base-émetteur : $v_{be} = r_\pi \cdot i_b$. Sa valeur se déduit de g_m et du gain en courant β :

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\beta V_T}{I_{C0}}$$

Ces deux paramètres, g_m et r_π, sont la base du modèle en petits signaux du transistor bipolaire.

---

b. Scénarios et exercices

L'ampli de Papa Ousmane à Mbandaka, dans la province de l'Équateur, est une vieille merveille. Il diffuse la rumba avec une chaleur incomparable. Tant que le volume reste modéré, le son est pur. Mais dès qu'il pousse le potentiomètre pour animer une fête de quartier, la catastrophe arrive. La guitare de Franco devient "sale", la voix de Tabu Ley se "casse". Son neveu, étudiant à l'ISTA, lui explique le phénomène. À fort volume, le signal audio n'est plus un "petit signal". Il devient trop grand et force le transistor à travailler loin de son point de repos, sur les parties très courbées de sa caractéristique. Le transistor n'est plus linéaire. Il génère de la distorsion, cette "saleté" sonore que Papa Ousmane déteste tant.

Exercice 1 : Le réparateur de radio à Mbuji-Mayi

Énoncé : Fiston, un jeune technicien électronique du Kasaï-Oriental, dépanne un vieil émetteur radio. Il analyse l'étage préamplificateur et mesure un courant de collecteur de repos $I_{C0} = 2$ mA. Le transistor utilisé est un BC547 avec un gain en courant $\beta = 100$. Fiston doit calculer les paramètres petits signaux g_m et r_π pour évaluer l'amplification. On prendra $V_T = 25$ mV.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Calcul de la transconductance (g_m)** La formule de la transconductance est $g_m = I_{C0} / V_T$.

$$g_m = \frac{2 \times 10^{-3}\,\text{A}}{25 \times 10^{-3}\,\text{V}} = 0.08\,\text{A/V ou } 80\,\text{mS}$$

2. **Étape 2 : Calcul de la résistance d'entrée dynamique (r_π)** La formule de la résistance d'entrée est $r_\pi = \beta / g_m$.

$$r_\pi = \frac{100}{0.08\ \text{A/V}} = 1250\ \Omega \text{ ou } 1.25\ \text{k}\Omega$$

3. **Étape 3 : Conclusion** Pour ce point de polarisation, le modèle petit signal du transistor est caractérisé par une transconductance $g_m = 80$ mS et une résistance d'entrée $r_\pi = 1.25$ kΩ.

Exercice 2 : Le projet de l'étudiante à Kisangani

Énoncé : Solange, étudiante en 3ème année Électronique à Kisangani, conçoit un préamplificateur pour microphone. Son cahier des charges impose une résistance d'entrée dynamique r_π de 2.5 kΩ. Le transistor dont elle dispose en stock a un gain $\beta = 120$. Quel courant de collecteur de repos I_{C0} doit-elle établir pour satisfaire cette contrainte ?

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Déterminer la transconductance (g_m) nécessaire** On part de la formule $r_\pi = \beta / g_m$. On l'isole pour trouver g_m.

$$g_m = \frac{\beta}{r_\pi} = \frac{120}{2500\ \Omega} = 0.048\ \text{A/V ou } 48\ \text{mS}$$

2. **Étape 2 : Calculer le courant de repos (I_{C0}) correspondant** On utilise la formule $g_m = I_{C0} / V_T$. On l'isole pour trouver I_{C0}.

$$I_{C0} = g_m \times V_T = 0.048\ \text{A/V} \times 0.025\ \text{V} = 0.0012\ \text{A}$$

3. **Étape 3 : Conclusion** Pour obtenir une résistance d'entrée de 2.5 kΩ, Solange doit polariser son transistor de manière à obtenir un courant de collecteur de repos $I_{C0} = 1.2$ mA.

1.2. Modèles en « pi » hybride (complet et simplifié) et calcul des paramètres

a. L'utilité d'un modèle simple

Pendant les années 1950, l'analyse des circuits à transistors devenait un casse-tête. Les premiers schémas équivalents étaient lourds et peu intuitifs. Il fallait un outil mental, une représentation simplifiée du comportement du transistor pour les petites variations de signal, les fameux "petits signaux".

Ce besoin a donné naissance au modèle en "pi" hybride. Son nom provient de la disposition de ses composants qui ressemble à la lettre grecque π. Il permet de transformer le transistor, un objet non linéaire complexe, en un circuit linéaire équivalent. Ce circuit est composé de résistances et d'une source de courant commandée. Une simplification géniale pour les calculs.

A. Le modèle complet de Giacoletto

Le modèle en pi hybride complet, aussi nommé modèle de Giacoletto, représente le comportement du transistor bipolaire en hautes fréquences. Chaque élément du modèle a une signification physique précise.

- $r_{b'b}$ (ou $r_{bb'}$): C'est la résistance d'accès de la base. Elle modélise la résistance du matériau semi-conducteur entre la connexion externe de la base et la région active interne.
- $r_{b'e}$ (ou r_{π}): C'est la résistance dynamique de la jonction base-émetteur polarisée en direct.
- $g_m v_{b'e}$: C'est une source de courant commandée en tension. Sa valeur dépend de la tension aux bornes de $r_{b'e}$ et de la transconductance g_m.
- r_{ce}: C'est la résistance de sortie du transistor, liée à l'effet Early.
- $r_{b'c}$ et $C_{b'c}$: Ils modélisent l'effet de la jonction base-collecteur polarisée en inverse.
- $C_{b'e}$: C'est la capacité de diffusion de la jonction base-émetteur.

Conforme au

Figure 2 : Réf. IMG (7913-3537-4510)

Schéma du modèle en pi hybride complet du transistor bipolaire

