# techno électronique.

CONFORME AU PROGRAMME NATIONAL

3ème Année

Option ÉLECTRONIQUE

EDITION 2025





# TABLE DES MATIÈRES

**PRÉLIMINAIRES** ..... **1**

1. Objectifs Généraux du Cours ..... 1
   - 1.1. Maîtrise des Systèmes Analogiques ..... 1
   - 1.2. Compétence en Logique Numérique ..... 1
   - 1.3. Application des Principes de Conversion d'Énergie ..... 1
   - 1.4. Développement de l'Expertise Pratique et Diagnostique ..... 1

2. Compétences Visées ..... 2
   - 2.1. Maîtrise des Fondamentaux Théoriques ..... 2
   - 2.2. Compétence Analytique et de Dépannage ..... 2
   - 2.3. Capacité de Conception et de Réalisation Pratique ..... 2

3. Approche Pédagogique ..... 2
   - 3.1. Fondation Théorique et Systémique ..... 2
   - 3.2. Méthodologie Analytique Ascendante ..... 3
   - 3.3. Ancrage Pratique et Diagnostic ..... 3

**PREMIÈRE PARTIE. LES TRANSDUCTEURS ÉLECTROACOUSTIQUES** ..... **4**

a. La conversion d'énergie comme principe fondamental ..... 4

b. Les deux directions du signal ..... 4

c. Les principes physiques en action ..... 4

d. De la rumba au journal parlé : l'impact quotidien ..... 4

**CHAPITRE 1. TECHNOLOGIE DES MICROPHONES** ..... **5**

1.1. Le microphone à charbon ..... 5
   - a. L'ancêtre robuste des télécommunications ..... 5
   - A. Principe de fonctionnement ..... 5

**FIGURE 1 : RÉF. IMG (5187-7697-6269)** ..... **7**

Schéma de principe d'une capsule de microphone à charbon ..... 7
   - B. Caractéristiques et limitations ..... 7

**FIGURE 2 : RÉF. IMG (4646-6367-4685)** ..... **10**

Circuit de polarisation typique d'un microphone à charbon ..... 10

MURHULA BAZIKANGE M.
*Directeur Editorial*
+243 860 655 590

- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....10

1.2. Le microphone électrodynamique (à bobine mobile).....12
- a. Du groupe électrogène au signal audio.....12
- A. Le principe : l'induction électromagnétique.....13
- B. Structure et fonctionnement.....13

1.3. Le microphone électrostatique (à condensateur).....15
- a. La précision au prix d'une contrainte.....15
- A. Le condensateur comme capteur de pression acoustique.....15
- B. La nécessité d'une polarisation : l'alimentation fantôme.....16

1.4. Le microphone piézoélectrique.....18
- a. Un effet venu des cristaux.....18
- A. Principe de fonctionnement.....19

**FIGURE 3 : RÉF. IMG (1299-4057-7767).....21**

Structure interne simplifiée d'un microphone à cristal piézoélectrique.....21
- B. Caractéristiques et contraintes.....21
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....22

**CHAPITRE 2. TECHNOLOGIE DES HAUT-PARLEURS.....24**

2.1. Le haut-parleur électrodynamique.....24
- a. De la vibration mécanique à l'onde électrique.....24
- A. Principe de fonctionnement.....24
- B. Les composants clés.....24

**FIGURE 4 : RÉF. IMG (1667-9917-5856).....27**

Coupe transversale schématique d'un haut-parleur électrodynamique et ses comp.....27
- Scénarios et Exercices.....27

2.2. Haut-parleurs électrostatiques et piézoélectriques.....29
- a. Le son par l'électricité statique.....29
- A. Le haut-parleur électrostatique : la membrane sous tension.....29

**FIGURE 5 : RÉF. IMG (2030-0068-6516).....32**

Structure interne d'un haut-parleur électrostatique à membrane Mylar.....32
- B. Le haut-parleur piézoélectrique : la céramique qui chante.....32

2.3. Les enceintes acoustiques : principes et technologies.....35
- a. Le paradoxe du son "nu".....35

- A. Le court-circuit acoustique : l'ennemi des basses fréquences.....35

**FIGURE 6 : RÉF. IMG (3767-1573-5626).....37**

Schéma du court-circuit acoustique et de l'enceinte close.....37

- B. Les deux familles principales d'enceintes.....37

**FIGURE 7 : RÉF. IMG (3231-3019-6498).....39**

Comparaison visuelle entre une enceinte close et une bass-reflex.....39

- L'artisan de Boma et ses baffles.....39

**CHAPITRE 3. PRINCIPES D'ENREGISTREMENT ET DE LECTURE AUDIO.....42**

3.1. Technologies d'enregistrement analogique (bande magnétique et disque vin.....42

- a. L'erreur de l'ingénieur du son.....42
- A. La Bande Magnétique : L'alignement des particules.....42

**FIGURE 8 : RÉF. IMG (1295-6131-1463).....43**

Schéma de principe d'une tête d'enregistrement sur bande magnétique.....43

- B. Le Disque Vinyle : La gravure mécanique.....43

**FIGURE 9 : RÉF. IMG (3737-9159-1889).....45**

Coupe transversale d'un sillon de disque vinyle et son diamant.....45

- Scénario d'application : Le trésor musical de Mbandaka.....45

3.2. L'enregistrement numérique : échantillonnage et quantification.....47

- a. De l'analogique au numérique.....47
- A. L'échantillonnage : découper le temps.....47

**FIGURE 10 : RÉF. IMG (1453-1012-0140).....50**

Conversion analogique-numérique : échantillonnage et quantification du signal.....50

- B. La quantification : mesurer l'amplitude.....50

3.3. La lecture numérique sur disque optique (CD).....52

- a. La naissance d'un standard mondial.....52
- A. Structure et codage du disque.....52
- B. Le principe de lecture optique.....53

**FIGURE 11 : RÉF. IMG (5514-2152-7711).....54**

Schéma simplifié du principe de lecture optique d'un disque compact.....54

- Scénarios et Exercices.....54

- Une panne de lecture à Kikwit.....54

**CHAPITRE 4. LA CHAÎNE ÉLECTROACOUSTIQUE.....57**

4.1. Schémas blocs des chaînes de sonorisation et d'enregistrement.....57

- a. La voix amplifiée.....57
- A. La chaîne de sonorisation (diffusion).....57
- B. La chaîne d'enregistrement.....58

**FIGURE 12 : RÉF. IMG (1720-0094-8259).....60**

Schéma bloc simplifié d'une chaîne électroacoustique de base.....60

- Anecdote : Le fiasco sonore du Nganda "Chez Leki".....60

4.2. L'adaptation des impédances.....62

- a. Le défi du transfert d'énergie.....62
- A. Impédance : la résistance au courant alternatif.....62
- B. Le Théorème du Transfert Maximal de Puissance.....63

**FIGURE 13 : RÉF. IMG (2368-8860-9711).....65**

Circuit montrant une source et une charge avec des impédances désadaptées.....65

**FIGURE 14 : RÉF. IMG (8678-9840-2382).....67**

Circuit illustrant l'adaptation parfaite pour un transfert de puissance maximal.....67

- C. Solutions pratiques d'adaptation.....67

4.3. Les niveaux de signal (micro, ligne, haut-parleur).....70

- a. Les grandeurs électriques du son.....70
- A. Le Niveau Micro (Mic Level).....70
- B. Le Niveau Ligne (Line Level).....70

**FIGURE 15 : RÉF. IMG (7494-2933-0773).....73**

Chaîne d'amplification d'un signal audio du micro au haut-parleur.....73

- C. Le Niveau Haut-Parleur (Speaker Level).....73

**FIGURE 16 : RÉF. IMG (4549-1887-9277).....76**

Comparaison des amplitudes de tension pour les niveaux micro, ligne, haut-par.....76

- b. Scénarios et Exercices.....76

**DEUXIÈME PARTIE. L'OPTO-ÉLECTRONIQUE : L'INTERACTION DE LA LUMIÈRE ET DE L'ÉL.....79**

Du photon à l'électron : un dialogue fondamental....79
Émettre la lumière : de la LED à l'infrarouge....79
Capter la lumière : l'œil électronique....79
Transmettre l'information : les autoroutes de la fibre optique....79

**CHAPITRE 5. LES COMPOSANTS ÉMETTEURS DE LUMIÈRE....80**

5.1. La technologie LED : du composant à l'éclairage de puissance....80
- a. La petite lumière qui change tout....80
- A. L'Électroluminescence : Le Cœur de la LED....80

**FIGURE 17 : RÉF. IMG (0170-3810-8826)....82**

Schéma du principe de l'électroluminescence dans une diode électroluminescent....82
- B. La LED de Puissance : Gestion Thermique et Efficacité....82

**FIGURE 18 : RÉF. IMG (1716-3237-1563)....85**

Structure d'une LED de puissance et son système de refroidissement thermique....85
- L'éclairage du stade de Boma....85

5.2. La Diode Laser....87
- a. De la lumière simple à la lumière ordonnée....87
- A. Principe de Fonctionnement : L'Émission Stimulée....87

**FIGURE 19 : RÉF. IMG (8989-4788-3619)....90**

Schéma structurel interne d'une diode laser et son principe d'émission....90
- B. Structure et Conditions d'Effet Laser....90
- C. SCÉNARIOS ET EXERCICES....91

5.3. Les afficheurs à 7 segments....93
- a. L'ancêtre de nos horloges numériques....93
- A. Structure et principe de fonctionnement....93

**FIGURE 20 : RÉF. IMG (7026-3483-9012)....95**

Structure interne d'un afficheur 7 segments anode et cathode commune....95
- B. Commande et décodage....95

**CHAPITRE 6. LES COMPOSANTS PHOTOSENSIBLES (DÉTECTEURS DE LUMIÈRE)....98**

6.1. La Photorésistance (LDR)....98
- a. De l'œil de l'artiste au capteur électronique....98

MURHULA BAZIKANGE M.
*Directeur Editorial*
+243 860 655 590

- A. Principe de fonctionnement....98
- B. Applications typiques....99
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....100

6.2. Détecteurs à jonction : photodiode et phototransistor....102
- a. De l'obscurité des pyramides à la lumière des circuits....102
- A. La photodiode : un œil électronique....102

**FIGURE 21 : RÉF. IMG (6605-5573-4804)....104**

Structure interne d'une photodiode et son symbole schématique....104
- B. Le phototransistor : la détection amplifiée....104
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....105

6.3. Applications des détecteurs de lumière....107
- a. L'oeil et la machine....107
- A. La commande par la lumière : de la télécommande à l'éclairage public....107

**FIGURE 22 : RÉF. IMG (1417-0788-3094)....109**

Schéma de principe d'une télécommande infrarouge et de son récepteur....109
- B. La communication optique et la mesure....109

**FIGURE 23 : RÉF. IMG (2332-0328-0687)....112**

Circuit de commande d'éclairage automatique utilisant une photorésistance (LDR)....112
- Une soirée à Kananga....112

**CHAPITRE 7. LES COMPOSANTS PHOTOVOLTAÏQUES....115**

7.1. L'effet photovoltaïque et la technologie de la cellule au silicium....115
- a. Une découverte au grand jour....115
- A. Le principe de l'effet photovoltaïque....115

**FIGURE 24 : RÉF. IMG (1591-0528-3802)....117**

Structure d'une cellule photovoltaïque et interaction avec un photon de lumière....117
- B. La cellule au silicium : le standard industriel....117

**FIGURE 25 : RÉF. IMG (8209-6371-4502)....120**

Comparaison visuelle entre le silicium monocristallin et le silicium polycris....120
- a. L'énigme du panneau solaire de Matadi....120

7.2. Caractéristiques d'une cellule solaire (I-V, MPP)....122


MURHULA BAZIKANGE M.
*Directeur Editorial*
+243 860 655 590

- a. L'énergie à la carte.....122
- A. La courbe Caractéristique Courant-Tension (I-V).....122
- B. Le Point de Puissance Maximale (MPP).....123

7.3. Du panneau solaire au système autonome.....125
- a. L'autonomie énergétique : une promesse en quatre actes.....125
- A. Les quatre piliers de l'autonomie.....125
- B. La chaîne de conversion et de gestion d'énergie.....125

**FIGURE 26 : RÉF. IMG (5857-0208-7416).....128**

Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque autonome domestique.....128
- b. Scénarios et Exercices.....128

**CHAPITRE 8. L'ISOLATION OPTIQUE ET LA TRANSMISSION PAR FIBRE.....131**

8.1. L'opto-coupleur : principe et applications.....131
- a. Le dialogue des sourds électriques.....131
- A. Principe de fonctionnement.....131

**FIGURE 27 : RÉF. IMG (8312-5260-7722).....133**

Structure interne et symbole schématique d'un opto-coupleur standard DIP-4.....133
- B. Caractéristiques et applications.....133

8.2. Principe de la transmission par fibre optique.....136
- a. Le guide de lumière.....136
- A. Structure de la fibre optique.....136

**FIGURE 28 : RÉF. IMG (4074-8906-9302).....137**

Coupe transversale et structure d'une fibre optique monomode.....137
- B. Le phénomène de réflexion totale interne.....137

**FIGURE 29 : RÉF. IMG (9936-6274-7027).....140**

Trajet d'un rayon lumineux par réflexion totale interne dans la fibre.....140
- C. Scénarios et Exercices.....140

8.3. Composants d'une liaison par fibre optique.....142
- a. Le message dans le tambour et le message dans la lumière.....142
- A. L'Émetteur Optique : La Source de Lumière.....142
- B. Le Support de Transmission : La Fibre Optique.....143
- C. Le Récepteur Optique : Le Détecteur de Lumière.....143


MURHULA BAZIKANGE M.
*Directeur Editorial*
+243 860 655 590

**FIGURE 30 : RÉF. IMG (5714-0847-5969)** ..... **144**

Schéma synoptique d'une liaison par fibre optique complète ..... 144

- Scénarios et Exercices ..... 144
- Une panne de réseau à l'Université de Lubumbashi ..... 144

8.4. Avantages et domaines d'application de la fibre optique ..... 146

- a. L'illusion de la taille ..... 146
- A. Les Avantages Techniques Incontestables ..... 146

**FIGURE 31 : RÉF. IMG (1649-0786-7214)** ..... **148**

Comparaison schématique entre la transmission par cuivre et par fibre optique ..... 148

- B. Les Domaines d'Application Stratégiques ..... 148

**TROISIÈME PARTIE. LA RÉVOLUTION DU CIRCUIT INTÉGRÉ** ..... **151**

L'ère des géants de fil ..... 151

Le principe du "tout-en-un" ..... 151

De la taille d'une armoire à la poche ..... 151

Les briques de la modernité ..... 151

**CHAPITRE 9. PROCÉDÉS DE FABRICATION DES CIRCUITS INTÉGRÉS** ..... **152**

9.1. Du silicium pur au 'wafer' ..... 152

- a. Le secret du grain de sable ..... 152
- A. De la matière brute au silicium de grade électronique (EGS) ..... 152
- B. La croissance du lingot monocristallin (Méthode Czochralski) ..... 152

**FIGURE 32 : RÉF. IMG (5588-5890-4952)** ..... **154**

Du silicium polycristallin brut au lingot monocristallin prêt à la découpe ..... 154

- C. Le sciage des lingots en 'wafers' ..... 154

9.2. Les étapes clés du procédé planaire (photolithographie, gravure, dopage) ..... 156

- a. Le principe du pochoir de précision ..... 156
- A. La Photolithographie : L'art du pochoir lumineux ..... 157
- B. La Gravure : Sculpter le silicium ..... 157

**FIGURE 33 : RÉF. IMG (2930-2482-9478)** ..... **159**

Cycle de la photolithographie et gravure sur une tranche de silicium ..... 159

- C. Le Dopage : Modifier les propriétés du silicium ..... 159

MURHULA BAZIKANGE M.
*Directeur Editorial*
+243 860 655 590

9.3. La métallisation et l'interconnexion des composants....161
- a. L'autoroute des électrons....161
- A. Le principe de la métallisation....162
- B. Le procédé par déposition....162
- C. La gravure des connexions....162

9.4. Test, découpe et encapsulation de la puce....165
- a. De la galette au trésor individuel....165
- A. Le test sur tranche (Wafer Probing)....165

**FIGURE 34 : RÉF. IMG (4497-8939-0064)....167**

Sonde de test vérifiant les puces sur une tranche de silicium....167
- B. La découpe de la tranche (Wafer Dicing)....167
- C. L'encapsulation (Packaging)....168

**FIGURE 35 : RÉF. IMG (2887-0925-8819)....170**

Étapes clés de l'encapsulation : de la puce nue au circuit intégré....170
- b. Anecdote du technicien de l'usine de Maluku....170

**CHAPITRE 10. LES FAMILLES DE CIRCUITS INTÉGRÉS LOGIQUES....173**

10.1. Le concept de famille logique....173
- a. Une question de langage commun....173
- A. Définition d'une famille logique....173
- B. Caractéristiques fondamentales et compatibilité....173

**FIGURE 36 : RÉF. IMG (7623-9027-8331)....176**

Niveaux de tension standard pour une porte logique TTL....176
- Une histoire de compatibilité à Bandundu....176

10.2. Les grandes familles logiques : TTL et CMOS....178
- a. Deux philosophies, une même fonction....178
- A. La famille TTL (Transistor-Transistor Logic)....178

**FIGURE 37 : RÉF. IMG (1765-1157-2811)....181**

Structure interne simplifiée d'une porte NON en technologie TTL....181
- B. La famille CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)....181

**FIGURE 38 : RÉF. IMG (3557-1827-9459)....184**

Schéma de base d'un inverseur logique en technologie CMOS....184

MURHULA BAZIKANGE M.
*Directeur Editorial*
+243 860 655 590

- Pour aller plus loin : Le choix du technicien de la SNEL....184

10.3. L'intégration à grande échelle (LSI, VLSI, ULSI)....186

- a. L'escalade de la complexité....186
- A. Les nouvelles échelles de la miniaturisation....187

**FIGURE 39 : RÉF. IMG (5816-4395-0208)....189**

Photographie au microscope de la puce d'un premier microprocesseur LSI....189

- B. Implications et défis technologiques....189

**FIGURE 40 : RÉF. IMG (5289-1389-3493)....192**

Vue artistique représentant les milliards de connexions dans une puce ULSI....192

- Le pari fou de Gordon Moore....192

**CHAPITRE 11. LES CIRCUITS INTÉGRÉS LINÉAIRES SPÉCIFIQUES....195**

11.1. L'amplificateur opérationnel (Ampli-Op) comme bloc de base....195

- a. L'idée avant le silicium....195
- A. Définition et symbole....195

**FIGURE 41 : RÉF. IMG (3084-4039-6029)....196**

Symbole schématique normalisé de l'amplificateur opérationnel et ses broches....196

- B. Le modèle de l'amplificateur opérationnel idéal....196
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....197

11.2. Les régulateurs de tension intégrés (série 78xx/79xx)....199

- a. La régulation, une quête ancienne....199
- A. La famille 78xx : le standard des tensions positives....199
- B. La famille 79xx : la symétrie des tensions négatives....200

11.3. Le circuit temporisateur NE555....203

- a. Une idée du temps....203
- A. Anatomie et brochage du NE555....203

**FIGURE 42 : RÉF. IMG (4748-1699-2041)....204**

Schéma de brochage standard du circuit intégré NE555 et ses connexions....204

- B. Les trois modes de fonctionnement....204

11.4. Les convertisseurs de données (CAN / CNA)....207

- a. Le pont entre deux mondes....207
- A. Le Convertisseur Analogique-Numérique (CAN)....207

- B. Le Convertisseur Numérique-Analogique (CNA).....207

**CHAPITRE 12. IDENTIFICATION ET UTILISATION DES CIRCUITS INTÉGRÉS.....211**

12.1. Technologies de boîtiers : traversants (DIP) et à montage en surface (SMD).....211

- a. Le passage du géant à la fourmi.....211
- A. Le boîtier DIP : Le géant fiable et traversant.....211
- B. Le boîtier SMD : Le champion de la miniaturisation.....211

**FIGURE 43 : RÉF. IMG (4223-8759-6445).....214**

Comparaison visuelle des boîtiers DIP traversants et des puces SMD.....214

- Scénarios et Exercices.....214

12.2. Le marquage et le décodage des références.....216

- a. La carte d'identité du composant.....216
- A. L'identification du fabricant et de la série.....216

**FIGURE 44 : RÉF. IMG (8108-3175-2181).....218**

Anatomie du marquage d'un circuit intégré standard.....218

- B. Le décodage du numéro de pièce (Part Number).....218

**FIGURE 45 : RÉF. IMG (9404-2787-8368).....221**

Comprendre la signification des suffixes à partir d'une datasheet.....221

- b. Scénarios et Exercices.....221

12.3. Justification technico-économique de l'utilisation des CI.....223

- a. L'évolution d'une idée.....223
- A. Les Critères Techniques.....223

**FIGURE 46 : RÉF. IMG (6157-3535-7388).....226**

Comparaison d'une platine à composants discrets et d'un circuit intégré.....226

- B. Les Critères Économiques.....226

**FIGURE 47 : RÉF. IMG (6748-5060-4008).....229**

Graphique illustrant la chute du coût par fonction logique avec le temps.....229

- b. Anecdote : La panne du panneau d'affichage à Matadi.....229

**ANNEXES.....232**

1. Mémento des Brochages de Circuits Intégrés Courants.....232

- A. Règles Générales d'Identification.....232


MURHULA BAZIKANGE M.
*Directeur Editorial*
+243 860 655 590

- B. Portes Logiques (Série 74xx)....232
- C. Temporisateur Universel : NE555....233
- D. Amplificateur Opérationnel Standard : LM741....234
- E. Régulateurs de Tension Linéaires Fixes....234

2. Guide sur les Précautions de Manipulation des Composants (ESD)....235
   - A. Définition et Physique du Phénomène ESD....235
   - B. Identification et Classification des Composants Sensibles (ESDS)....237
   - C. Principes Fondamentaux de la Protection ESD....237
   - D. Protocoles de Manipulation et de Contrôle....238

3. Tableau Comparatif des Familles Logiques....239
   - A. Paramètres Clés de Performance....239
   - B. Familles à Transistors Bipolaires (BJT)....240
   - C. Familles à Transistors MOS (MOSFET)....241
   - D. Famille Hybride....242

4. Introduction à la Lecture de Fiches Techniques (Datasheets) de CI....243
   - A. Définition et Portée du Document....243
   - B. Anatomie d'une Fiche Technique Standard....243

# PRÉLIMINAIRES

## 1. Objectifs Généraux du Cours

### 1.1. Maîtrise des Systèmes Analogiques

L'acquisition d'une compétence approfondie en électronique analogique est un axe fondamental. L'étudiant doit pouvoir analyser le comportement de circuits complexes, notamment les amplificateurs opérationnels, les filtres actifs et les oscillateurs. La finalité est le passage de l'analyse théorique à la synthèse, permettant la conception de fonctions électroniques répondant à un cahier des charges précis.

### 1.2. Compétence en Logique Numérique

La consolidation des savoirs en électronique numérique prépare l'étudiant à la manipulation des systèmes logiques. La maîtrise des circuits combinatoires et séquentiels est visée. L'objectif s'étend à la compréhension de l'architecture et du fonctionnement de base des microprocesseurs et des microcontrôleurs, piliers des systèmes embarqués modernes.

### 1.3. Application des Principes de Conversion d'Énergie

Un volet essentiel concerne la gestion de l'énergie électrique. L'étudiant doit maîtriser les principes du redressement, du filtrage et de la régulation de tension. Il s'agit de lui fournir les outils pour concevoir et dépanner des alimentations stabilisées, un prérequis pour tout système électronique fonctionnel.

### 1.4. Développement de l'Expertise Pratique et Diagnostique

Au-delà de la théorie, le développement d'une méthodologie rigoureuse de dépannage est primordial. L'étudiant apprendra à utiliser avec expertise l'oscilloscope, le multimètre et le générateur de fonctions pour diagnostiquer des pannes. La capacité à interpréter une mesure et à en déduire la cause d'un dysfonctionnement constitue la finalité de cet objectif.

## 2. Compétences Visées

### 2.1. Maîtrise des Fondamentaux Théoriques

L'acquisition des savoirs théoriques structure la formation de l'élève finaliste. Il s'agit de la maîtrise approfondie des principes régissant les circuits d'amplification, d'oscillation, de filtrage et de commutation. La compréhension des systèmes logiques séquentiels et combinatoires, ainsi que des architectures de base des microprocesseurs et microcontrôleurs, est également ciblée pour préparer l'élève aux technologies actuelles.

### 2.2. Compétence Analytique et de Dépannage

Au-delà de la théorie, le programme développe une rigueur méthodologique pour l'analyse fonctionnelle des systèmes électroniques. L'élève doit pouvoir interpréter un schéma complexe, identifier les blocs fonctionnels et leurs interactions. Cette compétence débouche sur la localisation et le diagnostic précis des pannes, en s'appuyant sur l'utilisation rationnelle des appareils de mesure (oscilloscope, multimètre, générateur de fonctions).

### 2.3. Capacité de Conception et de Réalisation Pratique

La finalité de ce cycle d'études est de former un technicien capable de traduire un besoin fonctionnel, formalisé par un cahier des charges simple, en un montage électronique opérationnel. Cette aptitude implique la sélection judicieuse des composants, le calcul des valeurs critiques et la simulation du comportement du circuit. La réalisation de prototypes sur platine d'essai et la validation des performances par la mesure confirment l'atteinte de cette compétence terminale.

---

## 3. Approche Pédagogique

Ce manuel adopte une structure didactique rigoureuse, conçue pour l'acquisition durable des compétences en électronique. L'organisation du savoir suit une logique spirale, où chaque notion fondamentale est d'abord maîtrisée avant d'être réinvestie dans des contextes plus complexes.

### 3.1. Fondation Théorique et Systémique

La maîtrise des principes physiques et des lois mathématiques constitue le socle de l'apprentissage. Chaque chapitre établit d'abord le cadre théorique indispensable. Les concepts, des lois de Kirchhoff à la physique des semi-

conducteurs, sont présentés de manière axiomatique. Cette base théorique solide permet ensuite à l'élève de développer un raisonnement systémique, capable de modéliser et de prédire le comportement des circuits.

## 3.2. Méthodologie Analytique Ascendante

L'enseignement progresse du simple vers le complexe, du composant vers le système. L'analyse débute par l'étude des composants électroniques individuels (diodes, transistors, amplificateurs opérationnels). Progressivement, ces éléments sont assemblés en fonctions électroniques de base (filtrage, amplification, oscillation), puis intégrés dans des montages complexes. Cette progression analytique ascendante assure une construction logique et cohérente des connaissances.

## 3.3. Ancrage Pratique et Diagnostic

Une finalité constante de cet ouvrage est la connexion de la théorie à la pratique professionnelle. Les chapitres intègrent systématiquement des schémas normalisés, des exemples de fiches techniques (datasheets) et des considérations sur l'implémentation. Les exercices sont orientés vers l'analyse de pannes et le diagnostic, préparant l'élève à identifier, isoler et corriger les dysfonctionnements, une compétence essentielle pour l'examen d'État et le métier de technicien.

# Première Partie. Les Transducteurs Électroacoustiques

## a. La conversion d'énergie comme principe fondamental

Un transducteur électroacoustique opère une conversion entre deux formes d'énergie. D'un côté, l'énergie acoustique, une vibration mécanique de l'air. De l'autre, l'énergie électrique, un flux d'électrons dans un circuit. Cet appareil sert de pont entre ces deux mondes. La qualité de cette transformation détermine la fidélité du son, de sa capture initiale jusqu'à sa restitution finale pour l'auditeur.

## b. Les deux directions du signal

Fondamentalement, l'univers des transducteurs se divise en deux familles aux fonctions opposées. La première famille capture le son : ce sont les microphones. Ils transforment la pression acoustique d'une voix à Gbadolite ou d'un instrument à Bukavu en une tension électrique variable. La seconde famille restitue le son, comme les haut-parleurs et les écouteurs. Ils réalisent le chemin inverse avec la même rigueur.

## c. Les principes physiques en action

Derrière chaque type de transducteur se cache un phénomène physique précis, exploité par l'ingénieur. L'électromagnétisme est le plus courant, avec le principe de la bobine mobile et de l'aimant. La piézoélectricité, propre à certains cristaux, permet de créer des microphones ou des capteurs très compacts. La variation de capacité d'un condensateur est aussi une technologie exploitée, notamment dans les microphones de studio pour leur sensibilité.

## d. De la rumba au journal parlé : l'impact quotidien

La maîtrise de ces composants est une compétence non négociable pour le technicien. Un journaliste à la radio de Kananga dépend de la fiabilité de son micro. Un ingénieur du son dans un studio de Kinshasa choisit son haut-parleur de monitoring pour sa neutralité. Du simple "wewa" au système de sonorisation d'une église à Matadi, la qualité de la communication repose directement sur ces transducteurs.

# Chapitre 1. Technologie des Microphones

## 1.1. Le microphone à charbon

### a. L'ancêtre robuste des télécommunications

Un des faits les plus marquants de l'histoire des télécommunications est la simplicité du premier microphone réellement fonctionnel. Sa technologie, basée sur la grenaille de charbon, a permis les premières conversations téléphoniques à longue distance. Elle a dominé l'industrie pendant près d'un siècle, de la fin du 19ème siècle jusqu'aux années 1980.

Cette longévité s'explique par une robustesse et un coût de fabrication très bas. Le microphone à charbon fut un composant clé des combinés téléphoniques, des interphones et de certains équipements militaires où la fiabilité primait sur la haute-fidélité.

### A. Principe de fonctionnement

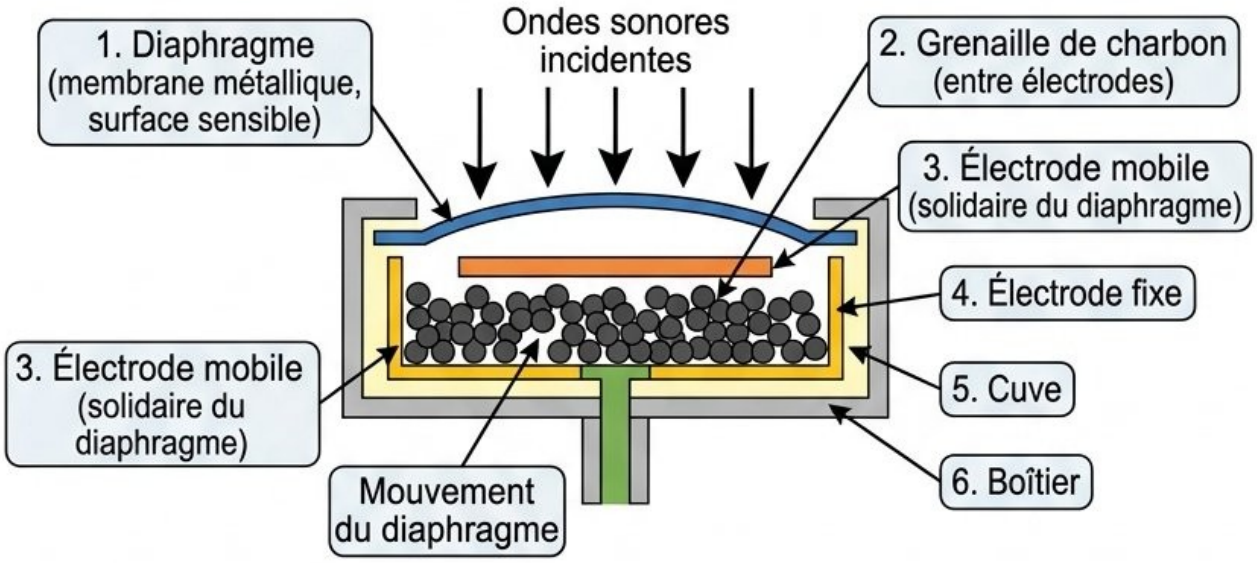
La conversion du son en signal électrique s'effectue par la variation de la résistance électrique d'un amas de granules de charbon. Une onde sonore frappe une membrane mobile, appelée diaphragme. Cette vibration exerce une pression variable sur les granules de charbon contenus dans une petite capsule.

Lorsque la pression augmente, les granules se tassent. Le contact entre eux s'améliore, et la résistance électrique globale diminue. Inversement, une dépression relâche les granules, augmentant la résistance. Pour fonctionner, le microphone doit être traversé par un courant continu de polarisation, fourni par une source externe. La variation de résistance module ce courant, créant ainsi un signal électrique alternatif qui est l'image de l'onde sonore.

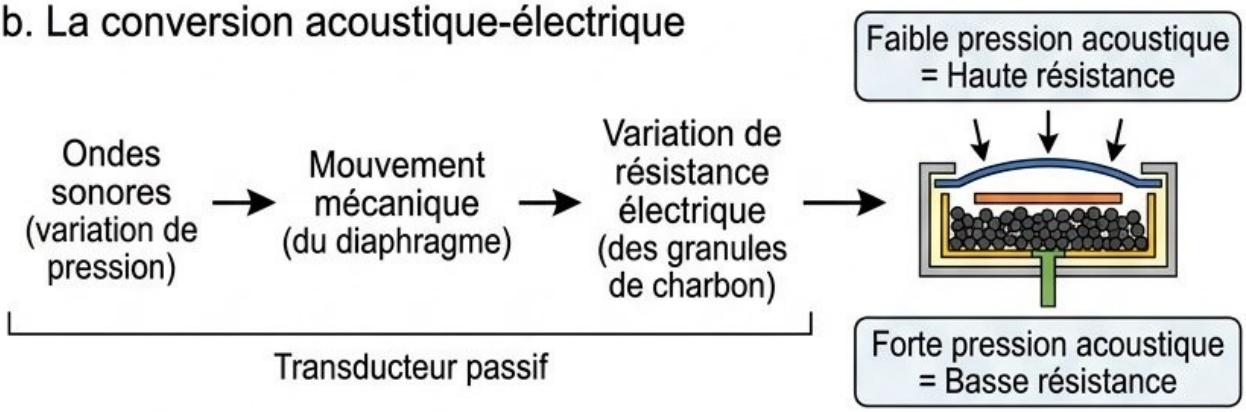
**Figure 1 : Réf. IMG (5187-7697-6269)**

Schéma de principe d'une capsule de microphone à charbon

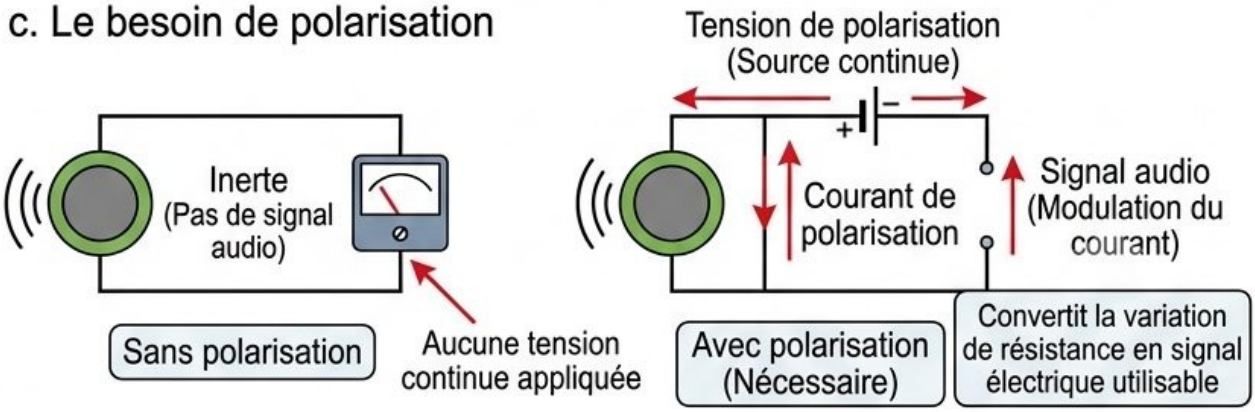
a. La structure interne




b. La conversion acoustique-électrique




c. Le besoin de polarisation



## Figure 1 : Réf. IMG (5187-7697-6269)

## Schéma de principe d'une capsule de microphone à charbon.

### a. La structure interne

L'illustration montre une coupe transversale de la capsule. Le diaphragme (membrane métallique) est la surface qui reçoit les ondes sonores. Juste derrière, une petite cuve contient la grenaille de charbon, maintenue entre deux électrodes. Une électrode est fixe, l'autre est solidaire du diaphragme. Le mouvement du diaphragme fait varier la distance et la pression entre les grains de charbon, modifiant ainsi la conductivité de l'ensemble. La simplicité de cette mécanique explique sa robustesse.

### b. La conversion acoustique-électrique

Le son est une variation de pression acoustique. Le diaphragme transforme cette variation en un mouvement mécanique. Ce mouvement est ensuite converti en une variation de résistance électrique par les granules de charbon. C'est un transducteur qui opère une double conversion : acoustique vers mécanique, puis mécanique vers électrique. Cette chaîne de conversion est directe et ne nécessite aucune électronique complexe au sein de la capsule elle-même.

### c. Le besoin de polarisation

Contrairement à un microphone dynamique, le microphone à charbon est un composant passif dont la résistance varie. Il ne génère pas de tension par lui-même. Pour obtenir un signal électrique, il est indispensable de l'alimenter avec une source de tension continue. Le signal audio est la modulation du courant de cette source. Sans polarisation, le microphone reste un simple résistor variable inerte.

## B. Caractéristiques et limitations

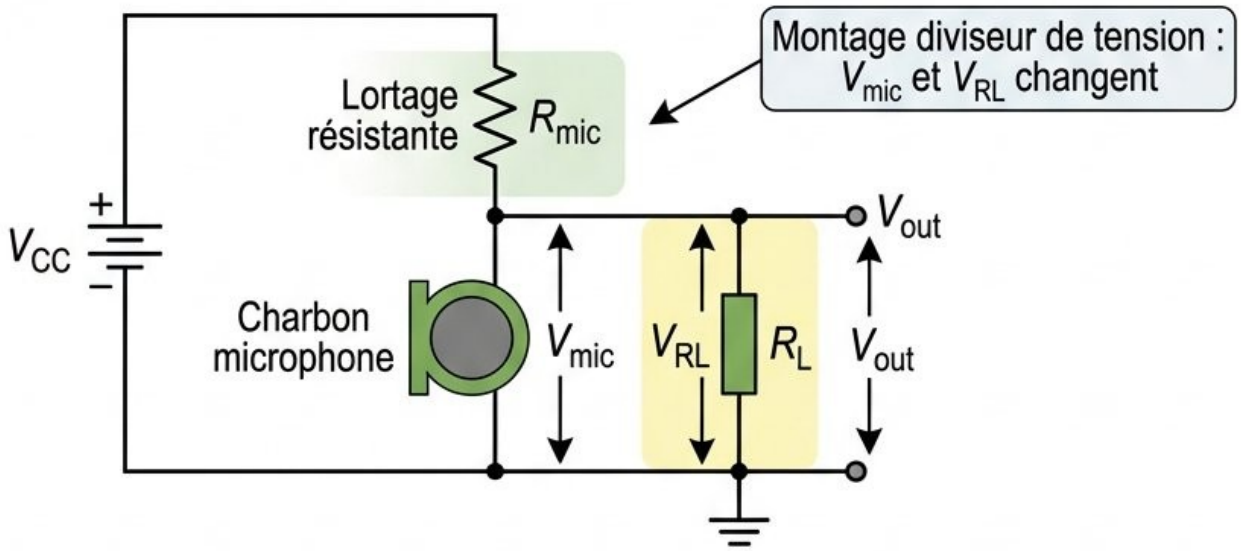
Le principal avantage du microphone à charbon est sa très haute sensibilité. La variation de résistance est si importante qu'elle produit un signal de sortie de forte amplitude. Ce phénomène crée un effet d'amplification mécanique interne, qui simplifiait grandement les premiers circuits téléphoniques.

Ses inconvénients sont cependant nombreux et rédhibitoires pour des applications de haute-fidélité. * **Le bruit de fond :** Le contact aléatoire entre les granules génère un souffle constant et des crépitements, appelé "bruit de grenaille". * **La distorsion :** La relation entre la pression et la résistance n'est pas parfaitement linéaire. Le signal électrique de sortie est donc une version déformée du son original. * **La bande passante :** Elle est très limitée, typiquement de 300 Hz à 3400 Hz. Cela correspond à la bande vocale téléphonique, mais est insuffisant pour la musique.

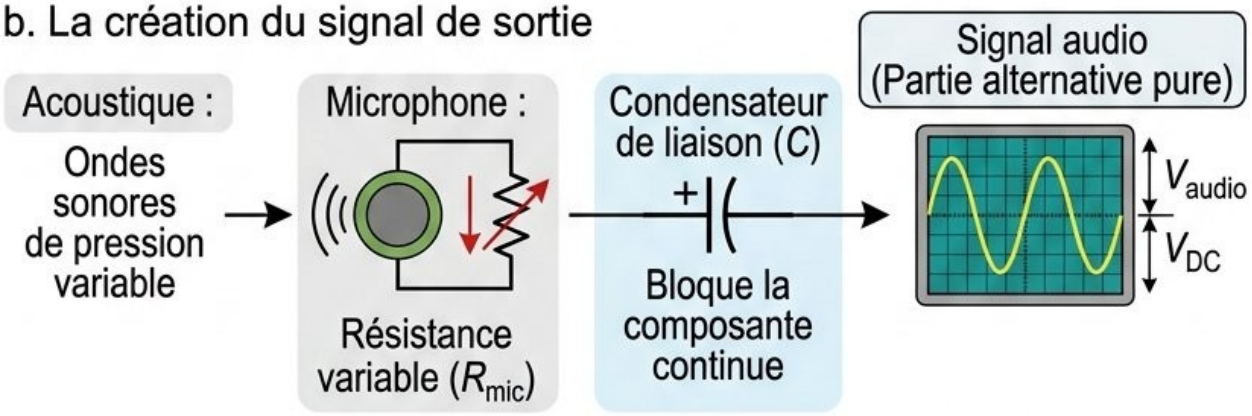
**Figure 2 : Réf. IMG (4646-6367-4685)**

Circuit de polarisation typique d'un microphone à charbon

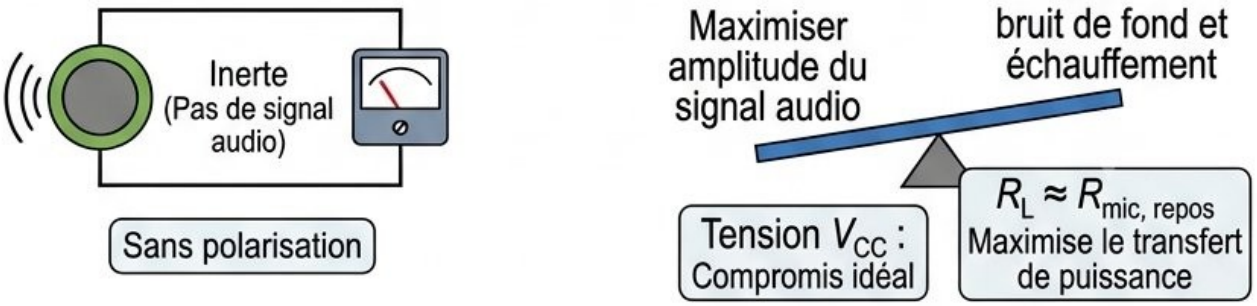
a. Le montage en diviseur de tension




b. La création du signal de sortie




c. Analyse de la performance



## Figure 2 : Réf. IMG (4646-6367-4685)

## Circuit de polarisation typique d'un microphone à charbon.

### a. Le montage en diviseur de tension

Ce schéma électrique illustre le montage le plus courant. Le microphone à charbon ($R_{mic}$) est placé en série avec une résistance de charge ($R_L$) et une source de tension continue ($V_{CC}$). Le signal de sortie ($V_{out}$) est récupéré aux bornes de la résistance de charge. C'est un montage de type diviseur de tension, où l'un des résistors (le microphone) a une valeur qui change en fonction du son capté.

### b. La création du signal de sortie

Lorsque le son fait varier $R_{mic}$, la tension aux bornes de $R_L$ change proportionnellement, selon la loi d'Ohm appliquée au diviseur de tension. Un condensateur de liaison (C) est souvent ajouté en sortie pour bloquer la composante continue de $V_{out}$ et ne laisser passer que la partie alternative, qui correspond au signal audio pur. Ce signal est ensuite envoyé vers un amplificateur ou une ligne de transmission.

### c. Analyse de la performance

Le choix de $V_{CC}$ et $R_L$ est un compromis. Une tension d'alimentation plus élevée augmente l'amplitude du signal de sortie, mais aussi le bruit de fond et l'échauffement des granules. La valeur de $R_L$ est généralement choisie proche de la résistance moyenne du microphone au repos pour maximiser le transfert de puissance et l'amplitude du signal alternatif.

---

## SCÉNARIOS ET EXERCICES

### Anecdote : Le téléphone de l'administrateur à Mbandaka

Dans les années 70, le bureau de l'administrateur du territoire à Mbandaka, dans la province de l'Équateur, était équipé d'un vieux téléphone noir à cadran rotatif. L'appareil, hérité de l'époque coloniale, fonctionnait encore parfaitement. Un jeune technicien de l'OCPT (l'ancêtre de la SCPT) fut un jour appelé car la ligne "grésillait énormément". Après avoir vérifié la ligne jusqu'au

central, il comprit que le problème venait du combiné. Il l'ouvrit, dévissa la capsule du microphone, la secoua vigoureusement avant de la revisser. Le grésillement avait disparu. Les granules de charbon, avec l'humidité, s'étaient simplement "agglomérés". Ce simple geste avait suffi à leur redonner leur mobilité, illustrant à la fois la faiblesse et l'étonnante simplicité de maintenance de cette technologie.

## Exercice 1 : Le diagnostic du technicien à Boma

**Énoncé :** Un technicien du port de Boma, au Kongo Central, est chargé de réparer un vieil interphone. Il constate que la communication fonctionne, mais qu'un fort bruit de friture est audible en permanence, même lorsque personne ne parle dans le microphone. Quelle est la cause la plus probable de ce défaut ?

**Résolution pas-à-pas :**

1. **Étape 1 : Identification du type de microphone** L'appareil étant un vieil interphone, il utilise très probablement un microphone à charbon pour sa robustesse et sa forte sensibilité.
2. **Étape 2 : Analyse du symptôme** Le symptôme décrit est un "bruit de friture" permanent. Ce type de bruit est caractéristique du "bruit de grenaille" généré par les contacts instables et aléatoires entre les granules de charbon dans la capsule du microphone.
3. **Étape 3 : Conclusion du diagnostic** La cause la plus probable du défaut est l'usure ou l'altération de la capsule du microphone à charbon. Avec le temps, les granules peuvent s'oxyder ou s'agglomérer, ce qui accentue le bruit de fond intrinsèque à cette technologie. Le remplacement de la capsule microphonique est la solution la plus directe.

## Exercice 2 : Calcul de la tension de sortie

**Énoncé :** Un microphone à charbon est monté en série avec une résistance de charge $R_L = 150\,\Omega$ et une source d'alimentation de 9V. Au repos, la résistance du microphone est $R_{mic} = 150\,\Omega$. Une parole forte fait varier la résistance du microphone entre $120\,\Omega$ et $180\,\Omega$. Calculez la variation de tension crête-à-crête (peak-to-peak) aux bornes de la résistance de charge $R_L$.

**Résolution pas-à-pas :**

1. **Étape 1 : Calcul de la tension de sortie au repos ($V_{repos}$)** On utilise la formule du diviseur de tension : $V_{out} = V_{alim} \times \frac{R_L}{R_{mic} + R_L}$.

$$V_{repos} = 9\,V \times \frac{150\,\Omega}{150\,\Omega + 150\,\Omega} = 9\,V \times \frac{150}{300} = 4.5\,V$$

2. **Étape 2 : Calcul des tensions de sortie extrêmes ($V_{min}$ et $V_{max}$)** On calcule la tension pour les deux valeurs extrêmes de la résistance du microphone.

   – Pour $R_{mic} = 180\,\Omega$ (pression faible, résistance maximale), la tension sera minimale :

   $$V_{min} = 9\,V \times \frac{150\,\Omega}{180\,\Omega + 150\,\Omega} = 9\,V \times \frac{150}{330} \approx 4.09\,V$$

   – Pour $R_{mic} = 120\,\Omega$ (pression forte, résistance minimale), la tension sera maximale :

   $$V_{max} = 9\,V \times \frac{150\,\Omega}{120\,\Omega + 150\,\Omega} = 9\,V \times \frac{150}{270} = 5\,V$$

3. **Étape 3 : Calcul de la tension crête-à-crête ($V_{pp}$)** La variation crête-à-crête est la différence entre la tension maximale et la tension minimale.

$$V_{pp} = V_{max} - V_{min} = 5\,V - 4.09\,V = 0.91\,V$$

Le signal audio en sortie a donc une amplitude crête-à-crête de 0.91 V.

---

## 1.2. Le microphone électrodynamique (à bobine mobile)

### a. Du groupe électrogène au signal audio

Pendant une coupure de courant à Mbuji-Mayi, le son d'un groupe électrogène qui démarre est familier. Ce groupe convertit un mouvement mécanique (moteur) en énergie électrique. Le son, lui aussi, est une forme d'énergie mécanique : une vibration de l'air.

Le microphone électrodynamique opère sur un principe inverse et miniature. Il transforme l'énergie mécanique d'une onde sonore en un signal électrique. C'est un minuscule groupe électrogène acoustique, sensible à la voix humaine ou au son d'un instrument.

## A. Le principe : l'induction électromagnétique

La loi de Faraday-Lenz est au cœur de ce transducteur. Un conducteur électrique, comme un fil de cuivre, se déplaçant dans un champ magnétique voit naître une tension électrique à ses bornes. L'amplitude et la fréquence de cette tension sont directement proportionnelles à la vitesse et à la fréquence du déplacement du fil. Le signal électrique produit est donc une copie fidèle du mouvement mécanique qui l'a engendré.

## B. Structure et fonctionnement

Anatomiquement, ce microphone combine trois éléments essentiels.

- **Le diaphragme :** Une membrane très légère qui vibre sous la pression des ondes sonores.
- **La bobine mobile :** Un enroulement de fil de cuivre très fin, solidaire du diaphragme. Elle est plongée dans l'entrefer d'un aimant.
- **L'aimant permanent :** Il crée un champ magnétique fixe, intense et stable dans lequel la bobine se déplace.

Lorsqu'une onde sonore frappe le diaphragme, il oscille. Cette vibration entraîne la bobine dans un mouvement de va-et-vient au sein du champ magnétique. Conformément au principe d'induction, une tension électrique alternative est alors générée aux bornes de la bobine. Ce signal électrique, bien que de très faible amplitude, est l'image analogique de l'onde sonore originale. Sa robustesse et sa simplicité en font un outil de choix sur scène et en reportage.

---

## Anecdote : Le micro indestructible du studio de la RTNC à Lubumbashi

Dans les années 90, le grand studio d'enregistrement de la RTNC à Lubumbashi accueillait une légende de la rumba pour une session. L'ingénieur du son principal, un vétéran respecté, avait confié la mise en place à un jeune stagiaire venu de Likasi, très nerveux à l'idée de côtoyer son idole. En ajustant le pied du micro de la voix principale, un Shure SM58 électrodynamique, le stagiaire le fit tomber lourdement sur le carrelage. Un silence glacial s'installa. L'ingénieur en chef, sans un mot, ramassa le micro, souffla sur la grille, le rebrancha et fit signe au chanteur. La voix sortit des moniteurs, claire et puissante, comme si rien ne s'était passé. "Ce micro est plus solide que la roche du Katanga", murmura-t-il au stagiaire.

## Exercice 1 : Le mystère du micro faible à la paroisse de Boma

**Énoncé :** Maman Hélène, cheffe de la chorale de la paroisse Saint-Esprit à Boma, est perplexe. Le nouveau microphone électrodynamique acheté au marché central semble beaucoup plus faible que l'ancien. Le son est propre, mais l'ingénieur du son doit pousser le volume de la console de mixage au maximum. Expliquez la cause technique la plus probable.

**Résolution pas-à-pas :**

1. **Étape 1 : Analyse des caractéristiques du micro** Le microphone électrodynamique est un transducteur passif. Il ne possède pas d'électronique interne pour amplifier le signal. Par nature, la tension qu'il génère par induction est très faible, de l'ordre de quelques millivolts ($mV$).

2. **Étape 2 : Identification du concept clé : L'impédance de sortie** Ces microphones ont une faible impédance de sortie (généralement entre 150 $\Omega$ et 600 $\Omega$). Ils sont conçus pour être connectés à des entrées de préamplificateurs micro, qui ont une impédance d'entrée environ 10 fois supérieure (loi de l'adaptation en tension).

3. **Étape 3 : Formulation de l'hypothèse technique** Le problème n'est pas le micro, mais son association avec la console. Il est probable que le micro soit branché sur une entrée "Ligne" (haute impédance, attendant un signal fort) au lieu d'une entrée "Micro" (basse impédance, avec un préamplificateur de gain élevé). Le préamplificateur de l'entrée Ligne est insuffisant pour amener le faible signal du micro à un niveau nominal. La solution est de brancher le micro sur la bonne entrée (XLR) de la console et d'ajuster le gain du préampli.

## Exercice 2 : Enregistrement de tam-tam au festival de Gungu

**Énoncé :** Jean, un jeune ingénieur du son de Bandundu-ville, est chargé de la sonorisation du festival de Gungu. Il utilise un microphone électrodynamique pour capter le son d'un percussionniste. Il remarque que le son du tam-tam manque de profondeur et de basses fréquences ("le grave"). Pourquoi ce type de micro a-t-il des difficultés à reproduire fidèlement les très basses fréquences ?

**Résolution pas-à-pas :**

1. **Étape 1 : Examen de la physique du système** Le système mobile est composé du diaphragme et de la bobine. Cet ensemble possède une masse, et donc une inertie. Pour se mettre en mouvement, il doit vaincre cette inertie.
2. **Étape 2 : Analyse du mouvement en fonction de la fréquence** Une onde sonore de basse fréquence correspond à une oscillation lente mais de grande amplitude de l'air. Pour suivre ce mouvement, l'ensemble diaphragme-bobine doit effectuer des déplacements lents et amples.
3. **Étape 3 : Conclusion sur la réponse fréquentielle** L'inertie de l'ensemble mobile s'oppose naturellement à ces grands déplacements lents. Le système a du mal à "suivre" les oscillations des très basses fréquences. En conséquence, sa sensibilité diminue dans le bas du spectre sonore. C'est une limitation mécanique inhérente à la conception du microphone électrodynamique, ce qui explique pourquoi d'autres technologies sont souvent préférées pour la capture d'infrabasses.

---

## 1.3. Le microphone électrostatique (à condensateur)

### a. La précision au prix d'une contrainte

Même si sa réputation de fragilité le précède, le microphone électrostatique est le roi des studios d'enregistrement, de Mbandaka à Lubumbashi. Son principe ne repose pas sur le mouvement d'une bobine, mais sur la variation de la capacité d'un condensateur. Cette technologie offre une capture sonore d'une fidélité et d'une sensibilité exceptionnelles.

Cette finesse de captation explique sa popularité pour l'enregistrement des voix et des instruments acoustiques. Le micro électrostatique exige cependant une source d'énergie externe pour fonctionner. Cette contrainte est le secret de sa performance, permettant de polariser sa capsule et d'alimenter son préamplificateur interne.

### A. Le condensateur comme capteur de pression acoustique

La structure d'un microphone électrostatique est simple et élégante. Il se compose de deux plaques conductrices (les armatures) très proches l'une de l'autre.

- Une plaque est fixe et rigide. Elle est appelée l'armature fixe.
- L'autre plaque est une membrane très fine et mobile, le diaphragme. C'est elle qui vibre sous l'effet de la pression acoustique des ondes sonores.

Ces deux plaques forment un condensateur. La capacité $C$ d'un tel dispositif dépend directement de la distance $d$ entre les armatures. La relation est inversement proportionnelle. Quand une onde sonore frappe le diaphragme, il se déplace. La distance $d$ varie, ce qui provoque une variation de la capacité $C$. Une tension de polarisation, constante, est appliquée aux bornes du condensateur. La variation de capacité engendre alors une variation de tension à ses bornes, créant un signal électrique qui est l'image exacte de l'onde sonore.

## B. La nécessité d'une polarisation : l'alimentation fantôme

Un microphone électrostatique est un composant actif. Il a besoin d'énergie pour deux raisons cruciales. Premièrement, pour appliquer une tension de polarisation aux armatures du condensateur. Deuxièmement, pour alimenter le circuit préamplificateur à très haute impédance (souvent un transistor à effet de champ, JFET) logé à l'intérieur du micro. Ce préampli adapte le signal fragile de la capsule pour qu'il puisse être transporté par un câble.

Cette énergie est fournie par une source externe. La méthode la plus courante est l'alimentation fantôme ("phantom power"). Il s'agit d'une tension continue, généralement de +48V, envoyée depuis la console de mixage ou le préamplificateur externe. Elle transite par le même câble blindé (XLR) qui transporte le signal audio du microphone, d'où son nom de "fantôme".

---

## Anecdote : La voix fragile de la forêt du Kasaï

Un documentariste animalier, parti près de Kananga pour enregistrer le chant rare d'un oiseau dans la réserve de la Lwika, s'est heurté à un problème. Son microphone dynamique, robuste et fiable, n'était pas assez sensible pour capter les subtiles nuances du chant de l'oiseau, noyées dans le bruit de la forêt. Frustré, il sortit de son sac son précieux microphone électrostatique.

Le changement fut immédiat. Le micro capta non seulement le chant cristallin de l'oiseau, mais aussi le bruissement des feuilles et le bourdonnement lointain des insectes. Cependant, sa joie fut de courte durée. Il devait constamment surveiller le niveau de batterie de son enregistreur