RDC419657

Édition 2026

RDC - AFRIQUE

SCIENCES APPLIQUÉES
OPTION ÉLECTRONIQUE

RADIO-ÉLECTRICITÉ

Maîtriser les principes des **ondes** et **circuits électroniques.**

3ème ANNÉE DES HUMANITÉS



TABLE DES MATIÈRES

PRÉLIMINAIRES **1**

1. Objectifs Généraux du Cours 1
   - 1.1. Consolidation des principes physiques de la radioélectricité 1
   - 1.2. Développement de l'analyse systémique des circuits radiofréquences 1
   - 1.3. Acquisition des compétences pratiques et diagnostiques 1

2. Compétences Visées 2
   - 2.1. Maîtrise des Fondements Théoriques des Radiocommunications 2
   - 2.2. Développement des Capacités d'Analyse et de Calcul 2
   - 2.3. Acquisition des Compétences Pratiques et Opérationnelles 2
   - 2.4. Consolidation des Méthodologies de Diagnostic et de Dépannage 2

3. Approche Pédagogique 3
   - 3.1. Le Cycle Inductif-Déductif 3
   - 3.2. La Compétence par la Résolution de Problèmes 3
   - 3.3. L'Approfondissement en Spirale 3

PREMIÈRE PARTIE : FONDEMENTS DES ONDES ET DE LA PROPAGATION RADIOÉLECTRIQUE **4**

a. Des ondes partout, tout le temps 4

b. La physique comme langage universel 4

c. Le voyage du signal : un parcours d'obstacles 4

d. Les objectifs de cette première partie 4

CHAPITRE 1 : LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES **5**

1.1. Nature du champ électromagnétique 5
   - a. L'intuition de Maxwell 5
   - A. L'engendrement mutuel des champs 5
   - B. Structure de l'onde électromagnétique 5

FIGURE 1 : RÉF. IMG (7181-8316-6764) **8**

Structure d'une onde électromagnétique se propageant dans l'espace 8
   - Scénarios et Exercices 8

1.2. Le spectre électromagnétique 10

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- a. Le monde au-delà de l'arc-en-ciel.....10
- A. Définition et organisation.....11
- B. Les grandes familles d'ondes.....11

FIGURE 2 : RÉF. IMG (4485-6396-2920).....12

Le spectre électromagnétique : un classement par fréquence et longueur d'onde.....12
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....12

1.3. Caractéristiques d'une onde radio.....14

CHAPITRE 2 : PROPAGATION DES ONDES RADIO.....15

2.1. L'onde de sol.....15
- a. L'onde qui colle à la terre.....15
- A. Définition et Mécanisme.....15
- B. Influence de la Fréquence.....15

FIGURE 3 : RÉF. IMG (9221-5462-8524).....18

Trajectoire de l'onde de sol selon la courbure de la Terre.....18
- C. Rôle de la Conductivité du Sol.....18
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....19

2.2. L'onde d'espace (ou onde directe).....21
- a. De l'œil humain à l'antenne radio.....21
- A. Définition et caractéristiques.....21

FIGURE 4 : RÉF. IMG (6518-6616-0317).....23

Schéma de la propagation en visibilité directe entre deux antennes.....23
- B. Portée et horizon radioélectrique.....23

FIGURE 5 : RÉF. IMG (6340-9166-1896).....26

Influence de la hauteur des antennes sur la portée de l'onde.....26
- Anecdote : Le défi de la radio communautaire à Isiro.....26

2.3. L'onde réfléchie (ou onde ionosphérique).....28
- a. Le miroir céleste.....28
- A. Structure de l'ionosphère.....28

FIGURE 6 : RÉF. IMG (3742-2341-8062).....31

Schéma des couches de l'ionosphère et de la réflexion d'une onde HF.....31

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- B. Fréquence critique et angle d'incidence.....31

FIGURE 7 : RÉF. IMG (7431-0368-5819).....34

Influence de la fréquence et de l'angle d'incidence sur la propagation.....34

- Scénarios et Exercices.....34

CHAPITRE 3 : LES ANTENNES : INTERFACE AVEC L'ESPACE.....37

3.1. Le principe de réciprocité.....37

- a. Une symétrie fonctionnelle.....37
- A. Définition et postulat de la réciprocité.....37

FIGURE 8 : RÉF. IMG (4920-7149-3876).....39

Principe de réciprocité : l'antenne en émission et en réception.....39

- B. Implications pratiques et techniques.....39

FIGURE 9 : RÉF. IMG (4687-8084-3075).....42

Identité de l'impédance d'entrée en émission et en réception.....42

- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....42

3.2. L'antenne dipôle demi-onde.....44

- a. L'intuition et la résonance.....44
- A. Structure et Impédance Caractéristique.....44

FIGURE 10 : RÉF. IMG (5634-7922-9741).....46

Structure et diagramme de rayonnement de l'antenne dipôle demi-onde.....46

- B. Calcul de la Longueur Physique.....46
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....47

3.3. Gain et directivité.....49

- a. Une question d'orientation.....49
- A. La directivité : Choisir sa cible.....49

FIGURE 11 : RÉF. IMG (3314-7078-6551).....51

Diagrammes de rayonnement comparés : antenne isotrope vs. antenne directive.....51

- B. Le gain : Quantifier la focalisation.....51

FIGURE 12 : RÉF. IMG (6668-4557-8261).....54

Visualisation du gain d'antenne avec un ballon de baudruche.....54

- C. Scénarios et exercices.....54

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

DEUXIÈME PARTIE : LES PRINCIPES DE LA MODULATION ET DE LA DÉMODULATION D'AMPL... 57

a. Le défi de la distance en radiocommunication... 57

b. Le principe de la porteuse à haute fréquence... 57

c. La modulation d'amplitude (AM) : une question d'enveloppe... 57

d. La démodulation : extraire l'information à l'arrivée... 57

CHAPITRE 4 : LA MODULATION D'AMPLITUDE (AM)... 58

4.1. Le but de la modulation... 58

- a. Le problème du transport du son... 58
- A. Le problème de la dimension de l'antenne... 58
- B. Le problème de l'interférence et du multiplexage... 59

FIGURE 13 : RÉF. IMG (8022-0653-8054)... 61

Comparaison entre un signal basse fréquence et une porteuse haute fréquence... 61

FIGURE 14 : RÉF. IMG (5834-8675-1937)... 63

Signal modulant, porteuse et signal modulé en amplitude (AM)... 63

- b. Anecdote : Le secret du technicien de la RTNC... 63

4.2. Le principe de la modulation d'amplitude... 65

- a. Le problème du transport de la voix... 65
- A. Les trois signaux fondamentaux... 65

FIGURE 15 : RÉF. IMG (8924-8833-7436)... 68

Représentation graphique des trois signaux de la modulation d'amplitude AM... 68

- B. L'indice de modulation (m)... 68

4.3. Spectre et puissance d'un signal AM... 71

- a. L'illusion de la fréquence unique... 71
- A. Le spectre fréquentiel d'un signal AM... 71
- B. La puissance dans un signal AM... 73

FIGURE 16 : RÉF. IMG (3275-4586-3653)... 75

Distribution de la puissance dans un signal AM selon l'indice m... 75

- La guerre des ondes dans le Kasaï... 75

CHAPITRE 5 : LA DÉMODULATION D'AMPLITUDE (DÉTECTION AM)... 78

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

5.1. Le but de la démodulation....78
- a. Le message caché dans l'onde....78
- A. Le principe fondamental : extraire l'enveloppe....78

FIGURE 17 : RÉF. IMG (2724-3762-4218)....80

Comparaison entre l'onde modulée en amplitude et son enveloppe audio....80
- B. La détection : une fonction non-linéaire et un filtrage....80

FIGURE 18 : RÉF. IMG (6511-6105-1861)....82

Schéma de principe d'un circuit simple de détection AM à diode....82
- b. Scénarios et exercices....82

5.2. La détection par diode....84
- a. L'énigme du signal reçu....84
- A. Le principe du redressement mono-alternance....84
- B. Le lissage du signal : le filtre passe-bas RC....85

FIGURE 19 : RÉF. IMG (1314-6955-4141)....87

Évolution du signal AM à travers le circuit de détection par diode....87
- C. Condition sur la constante de temps....87

5.3. Performances et limitations de la détection par diode....90
- a. La simplicité comme force et faiblesse....90
- A. La distorsion de seuil : le problème des signaux faibles....90
- B. La distorsion de constante de temps : le dilemme du filtre RC....90

FIGURE 20 : RÉF. IMG (1299-2090-5962)....92

Signal de sortie d'un détecteur à diode montrant la distorsion....92
- Anecdote : La radio de Grand-Père à Mbandaka....92

CHAPITRE 6 : LES RÉCEPTEURS RADIO AM SIMPLES....95

6.1. Le récepteur à cristal (poste à galène)....95
- a. La radio sans pile, un rêve ?....95
- A. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL....95
- B. LES QUATRE ÉTAGES FONDAMENTAUX....95

FIGURE 21 : RÉF. IMG (6449-1697-8014)....97

Schéma de principe d'un récepteur radio simple à cristal de galène....97
- C. AVANTAGES ET LIMITES....97

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

6.2. Le récepteur à amplification directe....100
- a. L'ancêtre de la radio moderne....100
- A. Principe de fonctionnement....100

FIGURE 22 : RÉF. IMG (7664-2922-7583)....102

Schéma-bloc d'un récepteur radio AM à amplification directe....102
- B. Avantages et inconvénients....102

6.3. Limitations des récepteurs à amplification directe....104
- a. La portée du signal....104
- A. Le dilemme Sensibilité-Sélectivité....105

FIGURE 23 : RÉF. IMG (3349-5754-2292)....107

Courbe de réponse d'un récepteur peu sélectif amplifiant les interférences....107
- B. L'instabilité et l'effet Larsen....107

TROISIÈME PARTIE : LE RÉCEPTEUR SUPERHÉTÉRODYNE ET SES ÉTAGES....111

a. La genèse d'une révolution....111

b. Le principe du changement de fréquence....111

c. Une architecture en blocs fonctionnels....111

d. L'hégémonie silencieuse du superhétodyne....111

CHAPITRE 7 : LE PRINCIPE DU RÉCEPTEUR SUPERHÉTÉRODYNE....112

7.1. Le but du changement de fréquence....112
- a. La stabilité, le Saint-Graal des amplificateurs radio....112
- A. L'instabilité inhérente des hautes fréquences (HF)....112
- B. La fréquence intermédiaire (FI) : une solution élégante....113

FIGURE 24 : RÉF. IMG (6491-5764-6358)....115

Principe du changement de fréquence vers une fréquence intermédiaire fixe (FI)....115
- Scénarios et Exercices....115
- Anecdote du technicien de Mbandaka....115

7.2. Le schéma bloc du récepteur superhétérodyne....117
- a. L'ingéniosité d'Edwin Armstrong....117
- A. Vue d'ensemble et principe de la transposition de fréquence....117

FIGURE 25 : RÉF. IMG (7677-3515-5051)....119

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Schéma bloc fonctionnel d'un récepteur radio superhétérodyne AM classique.....119
- B. Les étages fonctionnels en détail.....119
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....120

7.3. Le phénomène de battement et la fréquence image.....122
- a. L'analogie du musicien.....122
- A. Le mélangeur et la création de la fréquence intermédiaire.....122

FIGURE 26 : RÉF. IMG (4230-7841-1962).....124

Schéma bloc du mélangeur produisant la fréquence de battement.....124
- B. La fréquence image, un parasite indésirable.....124

FIGURE 27 : RÉF. IMG (2789-0106-8269).....127

Spectre de fréquences montrant le signal utile et sa fréquence image.....127
- b. Scénarios et Exercices.....127

CHAPITRE 8 : L'ÉTAGE D'ENTRÉE HAUTE FRÉQUENCE (HF).....130

8.1. Rôles de l'étage d'entrée.....130
- a. Le gardien des ondes.....130
- A. La Sélectivité : Le Tri Initial.....130

FIGURE 28 : RÉF. IMG (5427-6826-1463).....132

Schéma illustrant le filtrage sélectif d'un signal radio désiré.....132
- B. L'Amplification HF : Donner de la Voix au Signal.....132
- C. Le Rejet de la Fréquence Image : L'Anti-Sosie.....133

FIGURE 29 : RÉF. IMG (7650-0135-0840).....135

Mécanisme de la fréquence image dans un récepteur superhétérodyne.....135
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....135

8.2. Les circuits d'accord RF.....137
- a. Le portier de l'antenne.....137
- A. Le circuit résonant LC parallèle.....137

FIGURE 30 : RÉF. IMG (7552-6372-1415).....140

Schéma du circuit d'accord LC parallèle et sa courbe de résonance.....140
- B. Sélectivité et Facteur de Qualité (Q).....140
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....141

8.3. L'amplificateur RF.....143
- a. Le premier gardien du signal.....143
- A. Rôle et Fonctions Clés.....143
- B. Les Trois Qualités d'un Bon Amplificateur RF.....143
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....144

CHAPITRE 9 : LE CHANGEMENT DE FRÉQUENCE : MÉLANGEUR ET OSCILLATEUR LOCAL146

9.1. L'oscillateur local (OL).....146
- a. L'erreur fondamentale du débutant.....146
- A. Rôle et principe de l'Oscillateur Local.....146
- B. Stabilité : Le critère non négociable.....147

FIGURE 31 : RÉF. IMG (3022-4870-5967).....149

Schéma de principe d'un oscillateur local de type Colpitts.....149
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....149

9.2. Le mélangeur.....151
- a. Le principe du battement acoustique transposé à l'électronique.....151
- A. Principe de fonctionnement du mélangeur.....151

FIGURE 32 : RÉF. IMG (6360-0014-1484).....154

Schéma fonctionnel d'un étage mélangeur dans un récepteur radio.....154
- B. Différentes technologies de mélangeurs.....154

9.3. Avantages et inconvénients du changement de fréquence.....157
- a. La genèse d'une idée brillante.....157
- A. Les avantages : la quête de la stabilité et de la sélectivité.....157
- B. Les inconvénients : la fréquence image et la complexité.....158

CHAPITRE 10 : L'AMPLIFICATEUR À FRÉQUENCE INTERMÉDIAIRE (FI).....161

10.1. Rôle de la chaîne FI.....161
- a. Le principe de conversion de fréquence.....161
- A. L'amplification principale.....161
- B. La sélectivité fine.....161

FIGURE 33 : RÉF. IMG (7308-1172-6660).....163

Le filtrage sélectif de la chaîne FI sur le spectre radiofréquence.....163
- C. La stabilité du gain.....163
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....164

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

10.2. Les filtres FI....165
- a. Le gardien de la clarté....165
- A. Rôle et bande passante du filtre FI....166

FIGURE 34 : RÉF. IMG (2571-7501-7344)....167

Courbe de réponse idéale et réelle d'un filtre FI....167
- B. Technologies de filtres FI....167

FIGURE 35 : RÉF. IMG (4983-7524-5331)....170

Composants physiques : transformateur FI et filtre céramique....170
- Scénarios et Exercices....170
- Une réparation à Lubumbashi....170

10.3. Les étages amplificateurs FI....172
- a. L'entonnoir sélectif....172
- A. Rôle et Objectifs de l'Étage FI....172
- B. Le Circuit d'Accord et le Couplage....173

FIGURE 36 : RÉF. IMG (8367-2402-1779)....175

Schéma d'un amplificateur FI à transistor et transformateur doublement accordé....175
- C. La Mise en Cascade : Multiplier pour régner....175

FIGURE 37 : RÉF. IMG (0194-3801-9571)....177

Diagramme de trois étages amplificateurs FI connectés en cascade....177
- b. Scénarios et Exercices....177

CHAPITRE 11 : LA COMMANDE AUTOMATIQUE DE GAIN (CAG)....180

11.1. Le problème des variations de niveau....180
- a. L'instabilité naturelle du signal radio....180
- A. Origines physiques des fluctuations....180
- B. Conséquences sur les étages d'amplification....180

FIGURE 38 : RÉF. IMG (6040-2919-4380)....183

Schéma bloc simplifié d'un récepteur sans commande automatique de gain....183
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....183

11.2. Le principe de la CAG....185
- a. Le voyage sonore sur la RN1....185
- A. Détection et tension de commande....185

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

FIGURE 39 : RÉF. IMG (6642-3552-4026) **187**

Schéma bloc de la boucle de commande automatique de gain (CAG) 187

- B. La boucle de régulation 187

FIGURE 40 : RÉF. IMG (4580-5549-2465) **190**

Caractéristique idéale d'un récepteur avec une CAG efficace 190

- L'héritage radio de Grand-père à Uvira 190

11.3. Le schéma de principe de la CAG 192

- a. Le problème de la variation d'amplitude 192
- A. Détection et filtrage de la tension de commande 192

FIGURE 41 : RÉF. IMG (6967-9592-0830) **194**

Schéma de principe d'un circuit de CAG simple à diode 194

- B. Action sur les étages amplificateurs 194

FIGURE 42 : RÉF. IMG (4372-5143-4873) **197**

Application de la tension de CAG à un étage amplificateur FI 197

- Scénarios et Exercices 197
- a. L'anecdote de Papa Kanku à Mbuji-Mayi 197

ANNEXES **200**

1. Mémento des Blocs Fonctionnels du Récepteur Superhétérodyne 200
   - A. Antenne et Circuit d'Accord RF 200
   - B. Amplificateur RF (Radiofréquence) 200
   - C. Mélangeur et Oscillateur Local (OL) 201
   - D. Chaîne de Fréquence Intermédiaire (FI) 202
   - E. Démodulateur et Commande Automatique de Gain (CAG) 202
   - F. Étage Basse Fréquence (BF) 203
2. Tableau des Bandes de Radiodiffusion et Fréquences Intermédiaires 204
   - A. Radiodiffusion en Modulation d'Amplitude (AM) 204
   - B. Radiodiffusion en Ondes Courtes (SW / OC) 205
   - C. Radiodiffusion en Modulation de Fréquence (FM) 205
   - D. Principe et Rôle de la Fréquence Intermédiaire (FI) 206
   - E. Valeurs Normalisées des Fréquences Intermédiaires 206
3. Guide sur les Filtres Électroniques 207
   - A. Définition et Caractérisation Fondamentale 207

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- B. Classification des Filtres..... 208

4. Introduction aux Facteurs de Qualité (Q) et de Bruit (NF)..... 210
   - A. Le Facteur de Qualité (Q)..... 210
   - B. Le Facteur de Bruit (Noise Figure, NF)..... 212

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

PRÉLIMINAIRES

1. Objectifs Généraux du Cours

1.1. Consolidation des principes physiques de la radioélectricité

Ce cours établit une maîtrise approfondie des phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques. L'élève passe d'une connaissance descriptive à une compréhension quantitative des mécanismes d'émission et de réception. Il modélise les différents types de modulation (AM, FM) et de démodulation à travers leurs expressions mathématiques. La finalité est la capacité de justifier le choix d'une technique de transmission en fonction des contraintes physiques d'un environnement donné, du Bandundu au Sud-Kivu. L'analyse spectrale devient un outil fondamental de raisonnement.

1.2. Développement de l'analyse systémique des circuits radiofréquences

L'acquisition d'une pensée systémique est un objectif central. L'élève apprend à décomposer un appareil radioélectrique complexe (émetteur, récepteur) en blocs fonctionnels distincts : oscillateur, mélangeur, amplificateur RF/FI, filtre. Pour chaque bloc, il identifie la fonction, les signaux d'entrée/sortie et les paramètres de performance critiques. Cette compétence permet de lire et d'interpréter un schéma électronique complet. L'élève doit pouvoir expliquer l'interaction entre les différents étages et anticiper l'impact d'une défaillance sur l'ensemble du système.

1.3. Acquisition des compétences pratiques et diagnostiques

Au-delà de la théorie, ce programme vise l'autonomie technique de l'élève face à un circuit réel. Il doit manipuler avec précision les instruments de mesure standards : oscilloscope, générateur de signaux, multimètre et fréquencemètre. Il développe une méthodologie rigoureuse pour le dépannage, en partant de l'observation des symptômes pour formuler des hypothèses logiques. La compétence terminale évaluée est la capacité à localiser une panne sur un montage simple, de la source d'alimentation à l'étage final, comme exigé lors des épreuves pratiques de l'Examen d'État.

2. Compétences Visées

2.1. Maîtrise des Fondements Théoriques des Radiocommunications

À l'issue de cet enseignement, l'apprenant doit être capable de mobiliser un savoir conceptuel précis. Cette compétence se manifeste par la restitution et l'explication rigoureuse des principes de la modulation d'amplitude (AM) et de fréquence (FM). Elle inclut la description des phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques et la caractérisation des différents types d'antennes. La maîtrise des schémas fonctionnels des émetteurs et des récepteurs constitue le socle de cette compétence.

2.2. Développement des Capacités d'Analyse et de Calcul

L'étude des circuits radioélectriques développe une aptitude au raisonnement quantitatif. L'élève doit pouvoir analyser un circuit oscillateur, un amplificateur RF ou un mélangeur en calculant ses paramètres essentiels : fréquence d'oscillation, gain, bande passante et facteur de bruit. La compétence d'analyse systémique se vérifie par la capacité à décomposer un équipement complet en blocs fonctionnels et à prédire son comportement global.

2.3. Acquisition des Compétences Pratiques et Opérationnelles

Au-delà de la théorie, la formation vise une autonomie technique sur le terrain. L'apprenant doit manipuler avec précision les appareils de mesure spécifiques à la haute fréquence, notamment l'oscilloscope, l'analyseur de spectre et le générateur de signaux. Cette compétence implique la réalisation correcte des montages, la validation des mesures et l'interprétation des signaux observés.

2.4. Consolidation des Méthodologies de Diagnostic et de Dépannage

La finalité professionnelle de l'option électronique exige une solide compétence en maintenance. L'élève doit appliquer une démarche logique et structurée pour localiser une panne dans un système de radiocommunication. Cela comprend la capacité à formuler des hypothèses, à effectuer des mesures ciblées pour les valider ou les infirmer, et à identifier le composant ou l'étage défectueux en vue de son remplacement.

3. Approche Pédagogique

3.1. Le Cycle Inductif-Déductif

La démarche pédagogique privilégie une progression partant du phénomène observable vers sa modélisation mathématique. Chaque concept théorique trouve son origine dans une application technique concrète, issue du domaine de la radioélectricité ou de l'électronique de puissance. Cette induction initiale facilite ensuite l'appropriation des outils déductifs et du formalisme mathématique requis pour l'analyse et la conception de systèmes complexes, tels qu'un récepteur superhétérodyne ou un étage d'amplification de puissance.

3.2. La Compétence par la Résolution de Problèmes

L'acquisition des savoirs est systématiquement articulée à la résolution de problèmes techniques authentiques. L'objectif est de développer une compétence opérationnelle, préparant l'élève à l'analyse de pannes, à la maintenance d'équipements et aux épreuves certificatives (EXETAT). Les exercices proposés suivent une complexité graduelle, allant de l'application directe du cours à des scénarios de synthèse exigeant la mobilisation de connaissances issues de plusieurs chapitres.

3.3. L'Approfondissement en Spirale

Certains concepts fondamentaux sont abordés à plusieurs reprises au sein du cursus, avec un niveau de complexité et de formalisation croissant. Un filtre passif, initialement étudié sous l'angle qualitatif, sera par la suite analysé avec les outils de l'analyse complexe pour en déterminer la fonction de transfert et le diagramme de Bode. Cette méthode garantit un ancrage mémoriel durable et une maîtrise progressive des notions les plus abstraites de la discipline.

PREMIÈRE PARTIE : FONDEMENTS DES ONDES ET DE LA PROPAGATION RADIOÉLECTRIQUE

a. Des ondes partout, tout le temps

L'air qui nous entoure est un océan invisible de communications. Un message envoyé depuis Kinshasa arrive instantanément sur un téléphone à Mbuji-Mayi. Une émission de radio partie de Lubumbashi est captée dans un village du Kwilu. Ces actions quotidiennes reposent sur un phénomène physique puissant et discret : les ondes électromagnétiques. Leur étude commence par accepter cette réalité : l'espace n'est jamais vide.

b. La physique comme langage universel

La radioélectricité n'est pas de la magie, mais de la physique rigoureuse. Elle utilise le langage des mathématiques pour décrire le comportement des ondes. Des concepts comme la fréquence (le nombre d'oscillations par seconde), l'amplitude (la "force" de l'onde) et la longueur d'onde (la distance physique d'un cycle) sont les piliers de cette science. Maîtriser leur relation est la première étape vers la compétence technique.

c. Le voyage du signal : un parcours d'obstacles

Une antenne émet de l'énergie, mais le voyage de l'onde radio est complexe. Le signal interagit avec tout ce qu'il rencontre. Le sol, les bâtiments de Goma, l'humidité de la forêt près de Mbandaka, ou même les couches de l'atmosphère influencent sa trajectoire et sa puissance. Comprendre la propagation, c'est donc apprendre à anticiper et à déjouer ces obstacles naturels pour garantir une liaison fiable.

d. Les objectifs de cette première partie

L'étude débute par la définition des grandeurs fondamentales et des unités de mesure. Ensuite, les différents modes de propagation sont analysés : l'onde de sol qui suit la courbure de la Terre, l'onde d'espace pour les liaisons directes, et l'onde ionosphérique pour les longues distances. Ces bases sont les fondations indispensables pour aborder plus tard la conception des antennes et l'analyse des systèmes de transmission.

CHAPITRE 1 : LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

1.1. Nature du champ électromagnétique

a. L'intuition de Maxwell

Un des faits les plus structurants de la physique du 19ème siècle fut la séparation nette entre les phénomènes électriques et les phénomènes magnétiques. Ils étaient étudiés comme deux forces distinctes, avec leurs propres lois et leurs propres manifestations. Un aimant et une charge électrique semblaient appartenir à deux mondes différents.

Cette vision changea radicalement avec les travaux de James Clerk Maxwell. Il démontra mathématiquement que l'électricité et le magnétisme ne sont que les deux facettes d'une seule et même entité fondamentale : le champ électromagnétique. Cette unification est une des plus grandes réussites de la physique théorique.

A. L'engendrement mutuel des champs

Le cœur de la théorie électromagnétique repose sur une interaction dynamique.

- Un champ électrique variable dans le temps, noté $E(t)$, génère un champ magnétique, noté B.
- Réciproquement, un champ magnétique variable dans le temps, noté $B(t)$, génère un champ électrique, noté E.

Cette "danse" perpétuelle où chaque champ variable engendre l'autre est le moteur de la propagation de l'onde. Le champ ne reste pas localisé. Il se déplace, car la variation de l'un en un point crée une variation de l'autre un peu plus loin, et ainsi de suite. L'énergie se propage sans transport de matière.

B. Structure de l'onde électromagnétique

Une onde électromagnétique possède des propriétés géométriques et physiques immuables.

Premièrement, c'est une onde transversale. Cela signifie que les vecteurs du champ électrique $\vec{E}$ et du champ magnétique $\vec{B}$ sont toujours perpendiculaires l'un à l'autre. De plus, ils sont tous deux perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde.

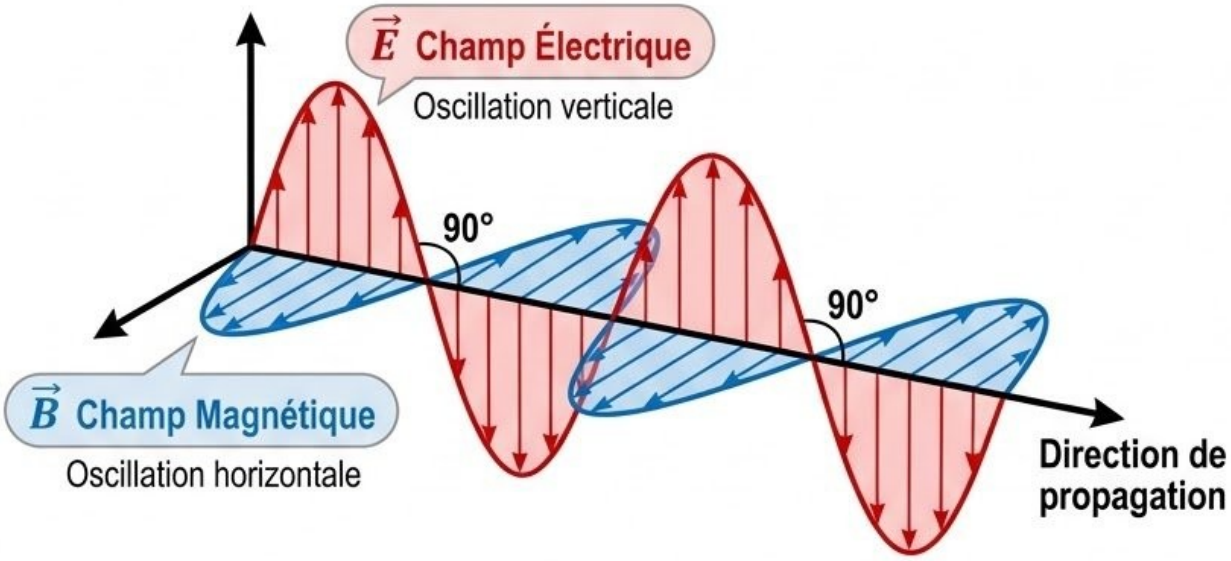
Deuxièmement, dans le vide, cette onde se propage à une vitesse constante et universelle : la vitesse de la lumière. Elle est notée c et sa valeur est d'environ $300\,000$ kilomètres par seconde ($c \approx 3 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$).

Enfin, une onde électromagnétique n'a pas besoin de support matériel pour se déplacer. Elle voyage parfaitement dans le vide de l'espace, contrairement aux ondes sonores qui nécessitent un milieu comme l'air ou l'eau.

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

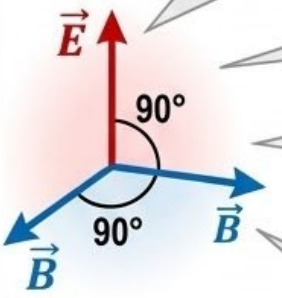
Figure 1 : Réf. IMG (7181-8316-6764)

Structure d'une onde électromagnétique se propageant dans l'espace



a. Orthogonalité des champs

Oscillation $\vec{E}$ ⊥ Oscillation $\vec{B}$



Angle constant de 90° à tout instant

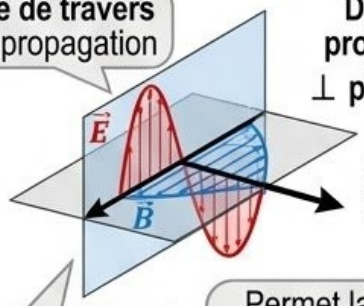
Condition fondamentale de l'existence

Découlant des Équations de Maxwell $\varepsilon_0 = \frac{\partial}{\partial c}$ $\Psi = \frac{\partial}{\partial t}$

b. Caractère transversal

Vibre de travers à sa propagation

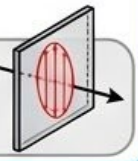
Direction propagation ⊥ plan ($\vec{E}$, $\vec{B}$)



Direction de propagation

Onde transversale (non compression)

Permet la **Polarisation** de la lumière



c. Propagation autonome

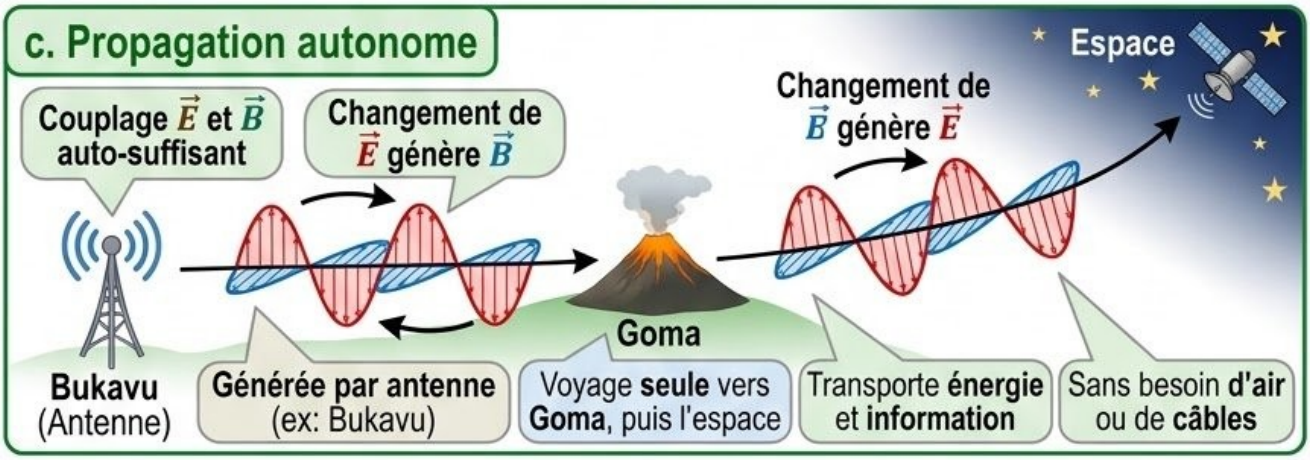


Figure 1 : Réf. IMG (7181-8316-6764)

Structure d'une onde électromagnétique se propageant dans l'espace

a. Orthogonalité des champs

L'illustration montre clairement que l'oscillation du champ électrique (en rouge, sur un axe vertical par exemple) est toujours orthogonale à l'oscillation du champ magnétique (en bleu, sur un axe horizontal). À tout instant et en tout point de l'onde, l'angle entre les vecteurs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ est de 90 degrés. Cette perpendicularité est une condition fondamentale de l'existence de l'onde. Elle découle directement des équations de Maxwell.

b. Caractère transversal

La direction de propagation (flèche noire) est elle-même perpendiculaire au plan formé par les deux champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$. L'onde ne vibre pas "dans le sens" de son déplacement, comme une onde de compression. Elle vibre "de travers", d'où le terme de transversale. C'est la raison pour laquelle on peut polariser la lumière, en filtrant une des directions d'oscillation du champ électrique.

c. Propagation autonome

Cette structure couplée $\vec{E}$ et $\vec{B}$ est auto-suffisante. Une fois générée, par exemple par une antenne à Bukavu, elle voyage de manière autonome vers Goma, puis à travers l'espace, transportant son énergie et l'information qu'elle module. Elle n'a besoin ni de l'air, ni d'un câble pour maintenir son existence. Elle se déplace grâce à l'engendrement mutuel et continu de ses deux composantes.

Scénarios et Exercices

Papa Odon, un ancien technicien de la RTNC à Mbuji-Mayi, aime raconter une anecdote à ses petits-enfants. Dans les années 80, il fallait parfois grimper sur un manguier avec un simple poste radio à piles pour capter "L'heure de l'auditeur" émise depuis Kinshasa. Les enfants, incrédules, demandaient : "Mais papa, comment la voix du journaliste traversait-elle la forêt du Kasaï sans fil ?". Odon souriait. Il expliquait que la voix n'était plus une voix, mais une "lumière invisible", une onde. Cette onde, née dans l'antenne de la capitale, voyageait plus vite que le son d'un tam-tam et n'avait besoin d'aucun chemin

tracé, ni d'aucun arbre pour s'appuyer. Elle se faufilait partout, invisible et instantanée.

Exercice 1 : Les parasites du générateur

Énoncé : À Gemena, dans la province du Sud-Ubangi, Maman Henriette allume son groupe électrogène pour alimenter sa maison. Elle constate que sa petite radio FM, posée à proximité, se met à grésiller fortement, rendant l'écoute de la station locale impossible. Expliquez ce phénomène en utilisant la théorie du champ électromagnétique.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Analyse de la source** Le groupe électrogène contient un alternateur. Cet alternateur produit un courant électrique alternatif (AC) qui circule dans les câbles d'alimentation. Par nature, ce courant varie constamment dans le temps.
2. **Étape 2 : Génération du champ électromagnétique parasite** Ce courant alternatif, en circulant dans les câbles non blindés, génère un champ magnétique variable. Conformément à la théorie de Maxwell, ce champ magnétique variable induit à son tour un champ électrique variable.
3. **Étape 3 : Propagation et interférence** L'ensemble de ces champs électrique et magnétique couplés forme une onde électromagnétique parasite. Cette onde rayonne autour du générateur et de ses câbles. L'antenne de la radio FM, conçue pour capter les ondes électromagnétiques, reçoit ce signal parasite en plus du signal de la station de radio.
4. **Étape 4 : Conclusion** Le grésillement est le résultat du mélange du signal utile (la radio) avec le signal parasite (l'onde générée par le groupe électrogène). Ce phénomène est appelé interférence électromagnétique (EMI).

Exercice 2 : La communication instantanée

Énoncé : Un navire quitte le port de Matadi pour Boma, sur le fleuve Congo. Le capitaine communique par radio VHF avec la capitainerie. Pourquoi le message est-il reçu à Boma quasi instantanément, alors que le son du klaxon du navire mettrait plusieurs minutes pour parcourir la même distance ?

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identification des types d'ondes**
   - La communication radio utilise une onde électromagnétique. La voix du capitaine est convertie en signal électrique, qui module cette onde.
   - Le klaxon du navire produit une onde sonore, qui est une onde mécanique.
2. **Étape 2 : Comparaison des milieux et des vitesses de propagation**
   - L'onde électromagnétique de la radio se propage dans l'air (et le quasi-vide) à la vitesse de la lumière, soit $c \approx 300\,000\,000\,\text{m/s}$.
   - L'onde sonore se propage dans l'air à une vitesse beaucoup plus faible, d'environ $343\,\text{m/s}$.
3. **Étape 3 : Calcul du rapport des vitesses** Le rapport entre les deux vitesses est de $3 \times 10^8 / 343$, soit environ 875 000. L'onde radio est près d'un million de fois plus rapide que l'onde sonore.
4. **Étape 4 : Conclusion** Sur la distance Matadi-Boma (environ 135 km), le temps de parcours pour l'onde radio est de $135\,000\,\text{m} / \left(3 \times 10^8\,\text{m/s}\right) \approx 0.00045$ secondes (instantané). Pour le son, il serait de $135\,000\,\text{m} / 343\,\text{m/s} \approx 393$ secondes, soit plus de 6 minutes.

1.2. Le spectre électromagnétique

a. Le monde au-delà de l'arc-en-ciel

Pendant des siècles, la seule lumière connue était celle visible par l'œil humain, de la flamme d'une bougie à l'arc-en-ciel après une pluie à Mbandaka. La science considérait ces couleurs comme la totalité du phénomène lumineux. Tout le reste était de l'ombre, du néant.

Cette perception a radicalement changé avec les travaux de James Clerk Maxwell. Ses équations prédisaient l'existence d'autres "lumières" invisibles, des ondes de même nature mais de fréquences et d'énergies différentes. La radioélectricité est née de cette intuition théorique.

A. Définition et organisation

Le spectre électromagnétique est le classement de toutes les ondes électromagnétiques par ordre de fréquence croissante ou de longueur d'onde décroissante. Ces deux grandeurs sont liées par une relation fondamentale.

La relation est $c = \lambda \cdot f$, où : - c est la célérité de la lumière dans le vide (environ $3 \cdot 10^8$ m/s). - λ (lambda) est la longueur d'onde en mètres (m). - f est la fréquence en hertz (Hz).

Une fréquence élevée correspond donc mathématiquement à une courte longueur d'onde. Inversement, une basse fréquence correspond à une grande longueur d'onde. L'énergie transportée par l'onde est directement proportionnelle à sa fréquence.

B. Les grandes familles d'ondes

Différentes plages de fréquences du spectre portent des noms distincts en fonction de leur source et de leurs applications.

Figure 2 : Réf. IMG (4485-6396-2920)

Le spectre électromagnétique : un classement par fréquence et longueur d'onde

a. Analyse Visuelle

Cette illustration représente le spectre électromagnétique comme un continuum. À gauche, les ondes radio ont de très grandes longueurs d'onde et de basses fréquences. À droite, les rayons gamma possèdent des longueurs d'onde infimes et des fréquences extrêmement élevées. La partie visible par l'œil humain n'est qu'une minuscule bande colorée au milieu de cette immense échelle. L'énergie de l'onde augmente de gauche à droite.

b. Les ondes de basse énergie

Ce groupe inclut les ondes radio (utilisées par la RTNC pour la diffusion), les micro-ondes (pour les téléphones portables et les fours à micro-ondes à Kisangani) et l'infrarouge (utilisé dans les télécommandes et les caméras thermiques). Ces ondes transportent une énergie relativement faible. Leurs longueurs d'onde peuvent aller de plusieurs kilomètres à quelques micromètres.

c. Les ondes de haute énergie

Au-delà du visible se trouvent les rayonnements à haute énergie. Les ultraviolets (UV) venant du soleil, les rayons X (utilisés en radiographie dans les hôpitaux de Lubumbashi) et les rayons gamma (issus de réactions nucléaires) sont dans cette catégorie. Leurs fréquences très élevées les rendent potentiellement dangereux pour les tissus biologiques.

SCÉNARIOS ET EXERCICES

Une chaleur invisible

En 1800, l'astronome William Herschel menait une expérience simple au sein de son laboratoire. Il a décomposé la lumière du soleil avec un prisme, projetant un arc-en-ciel sur une table. Curieux de mesurer la chaleur de chaque couleur, il a placé des thermomètres dans le rouge, le jaune, le vert et le bleu. Pour avoir une mesure de référence, il a aussi placé un thermomètre juste à côté du rouge, dans une zone où aucune lumière n'était visible. À sa

grande surprise, ce thermomètre "dans le noir" a affiché la température la plus élevée. Il venait de découvrir une lumière invisible transportant de la chaleur : le rayonnement infrarouge. Cette anecdote, simple comme une expérience de physique à l'UPN, prouve que nos sens ne perçoivent qu'une fraction infime de la réalité physique.

Exercice 1 : Radio Okapi à Kananga

Énoncé : Maman Hélène écoute Radio Okapi à Kananga, dans le Kasaï-Central. La station émet sur la fréquence 103.5 MHz. Quelle est la longueur d'onde de l'émission ?

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identifier les données et la formule** La fréquence f est 103.5 MHz, soit 103.5×10^6 Hz. La célérité de la lumière c est 3×10^8 m/s. La formule à utiliser est $\lambda = c/f$.

2. **Étape 2 : Appliquer la formule** On substitue les valeurs dans la formule.

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{103.5 \times 10^6}$$

3. **Étape 3 : Calculer le résultat**

$$\lambda \approx 2.89\,\text{m}$$

La longueur d'onde de l'émission de Radio Okapi sur cette fréquence est d'environ 2.89 mètres.

Exercice 2 : La télécommande du technicien

Énoncé : Papa Jean, un technicien en électronique au port de Matadi, au Kongo Central, répare une télécommande de climatiseur. Il mesure que la diode émettrice (LED) produit une onde électromagnétique dont la longueur d'onde est de 940 nm (nanomètres). À quelle catégorie du spectre électromagnétique appartient cette onde ?

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Convertir la longueur d'onde** La longueur d'onde est $\lambda = 940$ nm. Sachant que 1 nm = 10^{-9} m, on a $\lambda = 940 \times 10^{-9}$ m.

2. **Étape 2 : Situer la valeur dans le spectre** Le spectre visible s'étend d'environ 400 nm (violet) à 750 nm (rouge). La longueur d'onde de 940 nm est supérieure à celle de la lumière rouge.
3. **Étape 3 : Conclure** La région du spectre électromagnétique située juste après la lumière rouge (pour les longueurs d'onde croissantes) est l'infrarouge (IR). L'onde émise par la télécommande est donc un rayonnement infrarouge.

1.3. Caractéristiques d'une onde radio

⚠️ *[Contenu non généré : bloqué par les filtres IA.]*

CHAPITRE 2 : PROPAGATION DES ONDES RADIO

2.1. L'onde de sol

a. L'onde qui colle à la terre

Lorsque la nuit tombe sur un village du Kwilu, le son du tam-tam se propage loin, comme s'il rampait sur le sol. Les anciens savent que le son porte mieux lorsque l'air est calme et frais, en suivant les reliefs du terrain.

L'onde de sol en radioélectricité partage cette intuition. C'est une onde qui choisit de voyager au plus près de la surface terrestre, épousant sa courbure. Sa capacité à relier deux points dépend entièrement de la nature du sol qu'elle caresse et de sa propre fréquence.

A. Définition et Mécanisme

Une onde de sol est une onde électromagnétique qui se propage en suivant la courbure de la Terre. Elle est particulièrement efficace pour les basses et moyennes fréquences (LF et MF). Son déplacement est le résultat de l'interaction de l'onde avec la surface conductrice de la planète.

Ce mode de propagation se compose principalement de deux éléments : - **L'onde directe :** Elle voyage en ligne droite entre l'émetteur et le récepteur, si aucun obstacle ne les sépare. - **L'onde de surface :** Elle est la composante qui "colle" à la surface du sol. Elle subit un phénomène de diffraction qui lui permet de suivre la rotondité de la Terre, dépassant ainsi l'horizon optique. Pour que cette onde de surface existe, la polarisation de l'antenne d'émission doit être verticale.

B. Influence de la Fréquence

Fondamentalement, la fréquence dicte le destin de l'onde de sol. Son efficacité décroît très rapidement à mesure que la fréquence augmente.

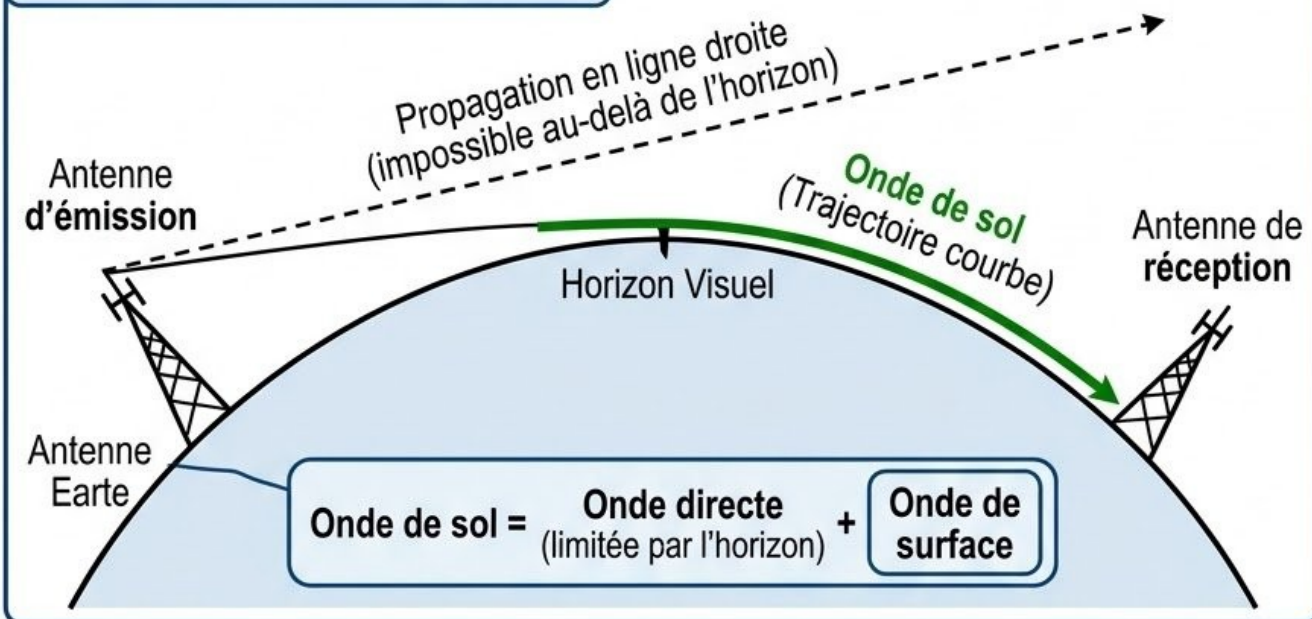
- **Basses Fréquences (LF, 30-300 kHz) et Moyennes Fréquences (MF, 300-3000 kHz) :** À ces fréquences, l'absorption par le sol est relativement faible. L'onde de surface peut parcourir des centaines, voire des milliers de kilomètres. C'est le mode de propagation des grandes stations de radio en ondes longues (OL) et ondes moyennes (OM/AM).
- **Hautes Fréquences (HF, > 3 MHz) :** L'absorption par le sol devient si importante que l'onde de surface s'atténue après seulement

quelques kilomètres. Pour ces fréquences, d'autres modes de propagation, comme l'onde d'espace, deviennent prédominants.

Figure 3 : Réf. IMG (9221-5462-8524)

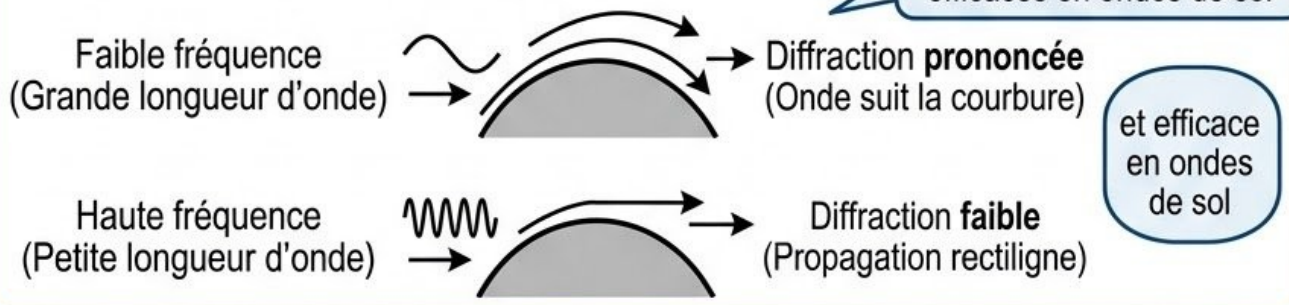
Trajectoire de l'onde de sol selon la courbure de la Terre

a. Description de la trajectoire



b. Phénomène de diffraction

Les basses fréquences sont efficaces en ondes de sol



et efficace en ondes de sol

c. Absorption par le sol

