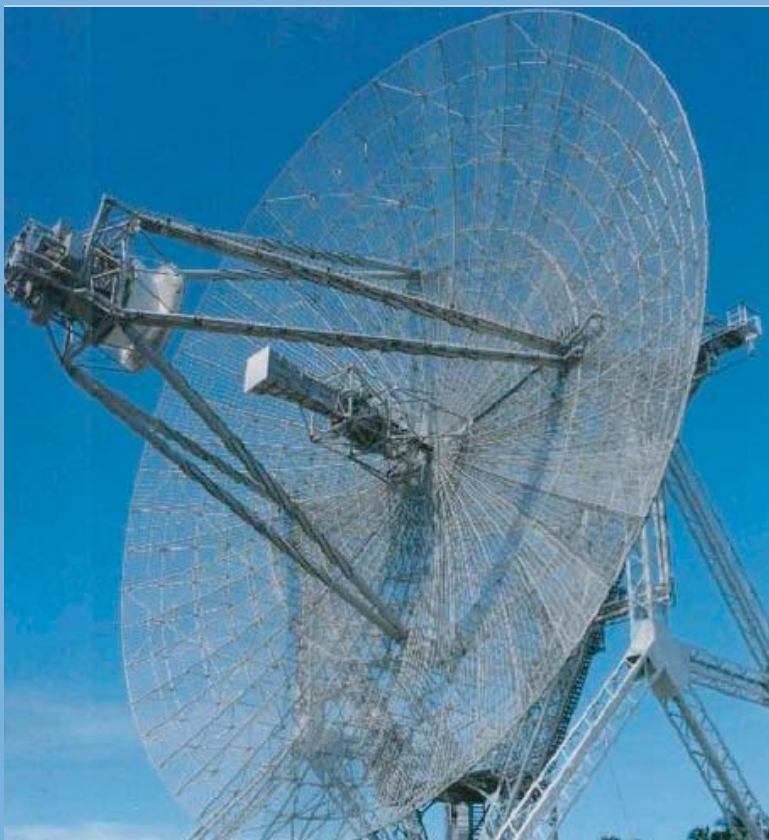


GÉNÉRALITÉS SUR LA TRANSMISSION DES SIGNAUX

12



Le Paraboloïde, communément appelé parabole, a révolutionné les communications à distance en très hautes fréquences.

- ◆ Avec quels types de transmission fonctionnent, les postes radio, les téléviseurs et les téléphones portables ?
- ◆ Qu'est-ce qui fait que les communications téléphoniques ainsi que les émissions de télévision en direct sont reçues instantanément ?
- ◆ Comment le modem d'un ordinateur assure-t-il la connexion à Internet ? Quelle est l'origine du nom "modem" ?

GENERALITÉS SUR LA TRANSMISSION DES SIGNAUX

La transmission des informations à distance a été toujours un problème qui a intrigué toute l'humanité. Grâce à la télécommunication qui a connu une évolution chronologique rapide (télégraphe, téléphone fixe, téléphone mobile, télévision...), les informations sont transmises d'une façon instantanée et à longues distances. De plus, elles passent à nos jours, de l'analogique au numérique pour améliorer la qualité du son et de l'image.

1 SIGNAL ET INFORMATION

L'être humain a cherché à transmettre les informations avec des moyens rapides et sûrs, que ce soit par le son, les feux ou les signaux lumineux.

Exemple 1

Le code Morse est un système représentant les lettres, les nombres et les signes de ponctuation à l'aide d'un code envoyé par intermittence. Il a été inventé en 1835 par l'américain Samuel Morse pour la télégraphie (Fig.1 et 2) et est constitué comme le précurseur des communications numériques.

Le code Morse peut être transporté via un signal radio intermittent que l'on émet par une impulsion électrique à travers un câble télégraphique, un signal mécanique (le son) ou visuel (flash lumineux comme l'indique la figure 3).

La figure 4 nous donne le code Morse adopté depuis l'année 1922. Chaque lettre lui correspond un ensemble de points et de tirets qui s'adaptent à toutes les langues .



Fig.1 : Télégraphe électrique de Morse(1837)



Fig.2 : Télégraphe de Breguet. (1844)



Fig.3 : Code Morse par un flash lumineux.

Questions

- 1°) Peut-on numériser le code Morse ?
- 2°) Dans l'affirmative , citer un exemple de numérisation.

Le code Morse est constitué par des points ou des tirets . La numérisation la plus simple consiste à associer :

- un état haut dont le nombre binaire associé est 1.
- un état bas dont le nombre binaire associé est 0.

Exemples : pour la lettre A , le nombre binaire associé est **01** . Pour B et C, on associe respectivement **1000** et **1010**.

A	● —	U	● ● —
B	— ● ● ●	V	● ● ● —
C	— ● — ●	W	● — —
D	— ● ●	X	— ● ● —
E	●	Y	— ● — —
F	● ● — ●	Z	— — ● ●
G	— — ●		
H	● ● ● ●		
I	● ●		
J	● — — —		
K	— ● —	1	● — — — —
L	● — ● ●	2	● ● — — —
M	— —	3	● ● ● — —
N	— ●	4	● ● ● ● —
O	— — —	5	● ● ● ● ●
P	● — — ●	6	— ● ● ● ●
Q	— — ● —	7	— — ● ● ●
R	● — ●	8	— — — ● ●
S	● ● ●	9	— — — — ●
T	—	0	— — — — —

Fig.4 : Le code morse international, tel que présenté dans un ouvrage de 1922, radio receiving for Beginners.



Samuel Morse (1791-1872) : Peintre et inventeur américain de la télégraphie

Questions

1°) Ecrire en consultant le tableau de la figure 4, les nombres binaires associés aux lettres (H,I,S et E).

Que peut-on conclure ?

2°) Quel est le plus grand nombre binaire utilisé par le code Morse et quelle est la lettre correspondante ?

Manipulation

- **Matériel** : On a besoin d'une pile 9 V et de plusieurs diodes électroluminescentes (DEL ou LED) vertes, rouges et bleues.

- **Objectif** : transmettre un message Morse via les LED.

- **Code adopté** :

- La DEL bleue représente le tiret de Morse.
- La DEL rouge représente le point de Morse.
- La DEL jaune représente l'espace entre deux lettres successives.

La figure 5 représente l'émission d'un message de la lettre A.

Expérience 1

On veut transmettre un message comportant le mot BIEN.

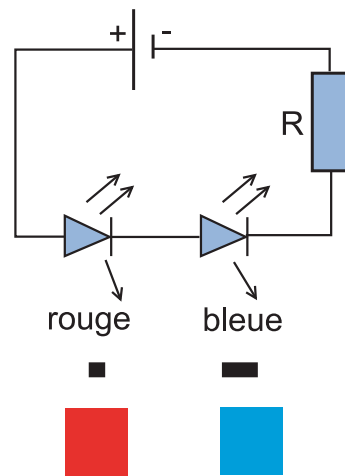


Fig.5 : Code Morse lumineux de la lettre A

D'après le code Morse, c'est : BRRRJRRJRJBR, mot à 12 bits nécessitant deux Leds bleues, sept rouges et trois jaunes.

Expérience 2

A l'aide du montage de la figure 5 et le même code, on écrit le mot suivant :



En consultant le tableau de Morse et le code adopté, on peut déchiffrer le mot transmis : **BAC**.

Question

Si une personne ne connaît pas le code adopté :

- reçoit -elle le signal ?
- décrypte-t-elle le message ?

Interprétation

Si on modifie le code, le décodeur reçoit le signal , mais le message perd son sens .

On reçoit des signaux lumineux (rouge , bleu et jaune) provenant des Leds mais nous n'avons aucune information en ignorant le code adopté.

Si par exemple, on adopte le code de la figure 6, représenter l'état des Leds pour le mot Bac.

Si le décodeur utilise l'ancien code , quel message décryptera-t-il ?

L'état des diodes **en adoptant le nouveau code** :



Le décodeur ne décryptera aucun mot (la première lettre ne figure pas dans le code Morse).

On remarque, d'après l'exemple ci-dessus, qu'on peut recevoir un signal sans avoir aucune information.

L'information nécessite la connaissance du code adopté.

Exemple 2

Si un citoyen tunisien adresse la parole à un étranger ignorant la langue arabe (un allemand par exemple), l'étranger reçoit un signal sonore mais il n'en tire aucune information. Dans ce cas, la langue arabe constitue le code que l'étranger ne peut pas déchiffrer.

L'exemple 2 confirme ainsi la remarque ci-dessus.

Exemple 3

La thermographie[⊙]infrarouge d'un chien est donnée par la figure 7 (chien photographié par une caméra à infrarouge).

Le rayonnement infrarouge émis par un corps chaud dépend de sa température.

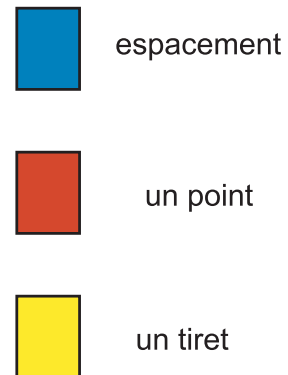


Fig.6 : Exemple de code lumineux

⊙ Procédé d'imagerie permettant de recueillir les variations de température à la surface d'un corps.

En se basant sur ce principe, on peut avoir une information sur la température à distance.

A droite de l'image du chien, on a représenté le lien entre la température et la couleur.

Questions

En se basant sur la figure 7 :

1°) Identifier la région la plus chaude et celle qui est la plus froide .

2°) Peut-on utiliser ce principe dans d'autres domaines ?

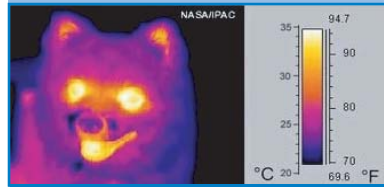


Fig.7 : Thermographie infrarouge d'un chien.

Analyse et commentaire

On remarque sur la photo de la figure 7 que la bouche, les yeux et les oreilles sont les parties les plus chaudes. Le bout du nez est une partie froide.

Pour cet exemple, le signal infrarouge est le support de l'information. L'information qui est la température du corps est toujours tributaire du code adopté (lien entre la température et le rayonnement infrarouge émis).

Ce principe est utilisé dans plusieurs domaines et notamment en astronomie pour la mesure de la température à la surface des planètes. La couleur de l'atmosphère d'une planète nous renseigne sur sa température et sa composition chimique.

Conclusion

La transmission d'une information nécessite l'utilisation d'un signal codé.
La réception d'un signal dont on ignore le code ne porte aucune information.

Remarque

L'auditeur, qui est à l'écoute des émissions radio, reçoit les informations par un support électromagnétique entre la station émettrice et le poste radio et un support sonore (signal mécanique) entre le haut-parleur et son oreille.

2 TÉLÉCOMMUNICATION D'UN SIGNAL

Lorsque nous ne sommes pas en contact direct à cause des distances qui nous séparent et nous avons besoin de communiquer en direct, nous avons recours à la télécommunication. Cette technologie moderne a débuté depuis 1792 en France avec le télégraphe aérien.



Définition

On appelle télécommunication toute transmission électronique d'informations (sons, images, écrits...) à distance (par fil électrique, fibre optique...).

2.1- SUPPORT DE TRANSMISSION EN TELECOMMUNICATION

La communication par la voix humaine via un support sonore a une portée assez limitée car le son émis par notre voix, étant de basses fréquences variant de 15 Hz à 20 kHz environ, s'atténue rapidement.

A l'aide d'un microphone, on transforme le signal sonore en un signal électrique de basses fréquences. Celui-ci a la propriété de générer un type d'onde connue sous le nom d'onde électromagnétique, de plus grande portée que l'onde sonore. Ainsi, en jouant le rôle de support de transmission de l'information (signal sonore), l'onde électromagnétique est considérée comme l'onde porteuse (ou la porteuse tout court). La figure 8 représente la première télécommunication filaire : en parlant devant un microphone, les vibrations de sa membrane entraînent le mouvement d'une bobine à travers un aimant permanent. Ces vibrations donnent naissance à un courant induit qui se propage dans les fils.

Remarque

En télécommunication, on a besoin de transformer l'énergie sonore en énergie électrique et vice-versa, d'où le besoin d'un transducteur, appareil capable de transformer un signal quelconque en un signal électrique.

Le haut parleur et le microphone sont les transducteurs les plus utilisés en télécommunications (Fig.9 et 10).

Conclusion

Etant de faible portée, les ondes sonores ne peuvent être télécommuniquées telles quelles sur des grandes distances.

En télécommunication, le support de transmission des signaux est l'onde électromagnétique, d'où sa qualification de porteuse (ou onde porteuse).



Fig.8 : Alexander Graham Bell parlant au premier téléphone électrique en 1876. C'est la première télécommunication filaire.



Fig.9 : Haut-parleur est un transducteur de base en communication



Fig.10 : Microphone

2.2- MODULATION ET CANAL DE TRANSMISSION

Au cours de la télécommunication d'un signal, la porteuse (onde électromagnétique) se trouve modifiée par ce dernier : on dit qu'elle est modulée par le signal qu'elle porte. Par suite, la télécommunication d'un signal est qualifiée comme étant une transmission par modulation, alors que le signal de basse fréquence qui a provoqué la modulation est appelé signal modulant.

En radiophonie ou en téléphonie par exemple, plusieurs signaux sonores sont émis simultanément. Pour pouvoir les détecter séparément à la réception, suffit-il de fixer pour leurs porteuses des fréquences N_p différentes ?

La réponse est NON car les sons émis sont audibles par l'être humain. Or, ceux-ci ont des fréquences allant approximativement de 15 Hz à 20 kHz, bande à laquelle l'oreille est sensible. De cette manière, chacun des signaux émis va être transmis sous forme d'un signal modulé caractérisé par la bande de fréquence $[N_p - 20 \text{ kHz}, N_p + 20 \text{ kHz}]$ environ et que l'on appelle canal de transmission du signal.

Par conséquent, les signaux provenant de sources différentes ne peuvent être identifiés nettement à la réception que si leurs canaux de transmission n'empiètent pas les uns les autres, c'est-à-dire, il faut que chaque signal soit transmis sur un canal qui lui est propre. En d'autres termes, il ne faut pas que la différence entre deux fréquences porteuses voisines N_{p1} et N_{p2} soit inférieure à deux fois 20 kHz. Il faut plutôt, entre deux fréquences N_p voisines, une différence de l'ordre du double de la fréquence maximale audible par l'homme au minimum.

Questions

1°) Dans les lignes téléphoniques, comment plusieurs communications ont lieu simultanément sans qu'il y ait brouillage du signal ?

2°) Pourquoi les chaînes de radiodiffusion sur la bande des ondes hectométriques (ou petites ondes PO), émettent-elles leurs programmes à des fréquences espacées généralement de 9 kHz ?

Interprétation

Pour transmettre un signal, on doit avoir un support de très grande portée : c'est l'onde électromagnétique, onde de haute fréquence.

En téléphonie, le signal sonore est transformé en un signal électrique. Celui-ci module un autre signal de même type, mais

de haute fréquence qui, à son tour, génère une onde électromagnétique qui va constituer la porteuse.

Soient N_{p1} la fréquence de la porteuse des paroles de l'une des deux personnes en communication téléphonique et N_{p2} , la fréquence de celle des paroles de la deuxième personne qui est à l'autre bout de la ligne. Pour que les deux personnes puissent entrer en conversation claire, il faut que les canaux centrés respectivement sur N_{p1} et N_{p2} soient distincts. Autrement dit, la ligne téléphonique doit être caractérisée par deux canaux de transmission différents entre eux et avec ceux des autres lignes.

En radiophonie, bien que chaque station émette à une fréquence bien déterminée (fréquence de la porteuse) affichée sur le poste radio quand il y est accordé, elle est caractérisée par son canal de transmission. La largeur de celui-ci peut être réduite à une valeur inférieure même à la largeur en fréquence 20 kHz du signal sonore émis par la voix humaine. Toutefois, bien que la qualité de la transmission ne soit pas de haute qualité dans ces conditions, elle reste satisfaisante car en audio, les fréquences des signaux sonores les plus aigus sont nettement inférieures à 10 kHz. De plus, ils sont traités au niveau de la modulation, ce qui explique pourquoi il est permis aux stations de radiodiffusion d'émettre en PO à des fréquences espacées de 9 kHz.

Autres exemples

Exemple 1

La télécommande émet des signaux infrarouges déchiffrables par un détecteur programmé (Fig.11).



Fig.11 : La télécommande est l'un des outils de la télécommunication infrarouge domestique

Questions

- 1°) Comment chaque bouton de la télécommande donne-t-il une information spécifique au récepteur ?
- 2°) Quel est le support de transmission des informations ?
- 3°) Est-ce que le signal et le support suffisent pour une transmission adéquate ?

La diode infrarouge est alimentée par un multivibrateur produisant une tension en créneaux dont les fronts ascendants et descendants sont programmés au cours du temps (Fig.12). La diode infrarouge produit un signal lumineux infrarouge dont le support est une onde électromagnétique.

L'information est un ensemble de créneaux ayant un rapport cyclique qui varie d'un bouton à un autre (Fig.13).

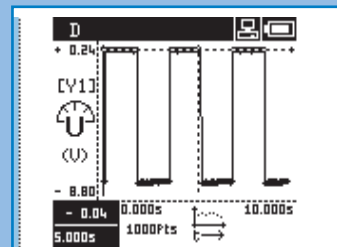


Fig.12 : Créneaux alimentant la diode infrarouge

Ainsi, l'information émise par la télécommande est codée. Par conséquent, il faut à la réception un décodeur approprié.

Exemple 2

Avec trois lasers (bleu, vert et rouge), on veut transmettre une information à distance :

- il fait beau (on allume le laser vert).
- il fait chaud (on allume le laser rouge).
- il fait froid (on allume le laser bleu).

Question

Dans l'exemple 2, quel est le support de l'information ?

Interprétation

Le support est le rayonnement laser : c'est un support électromagnétique.

La couleur du rayonnement émis est l'information.

S'il y a deux émetteurs identiques, on ne peut pas savoir l'origine de l'information, d'où le besoin d'un canal de transmission caractérisant l'origine de l'information.

Si par exemple l'un des deux émetteurs choisit une quatrième diode laser de couleur Jaune et l'autre choisit une quatrième diode laser orangée, on différencie, dans ces conditions, l'origine de l'information. Les deux diodes laser (jaune et orangée) constituent chacune un canal de transmission.

Exemple 3

Pour tous les systèmes d'alarmes (ambulance, pompiers, voitures, etc....) :

- le support de l'information est l'onde sonore,
- l'information est la fréquence du son (aigu ou grave),
- le timbre du son émis est le canal de transmission.

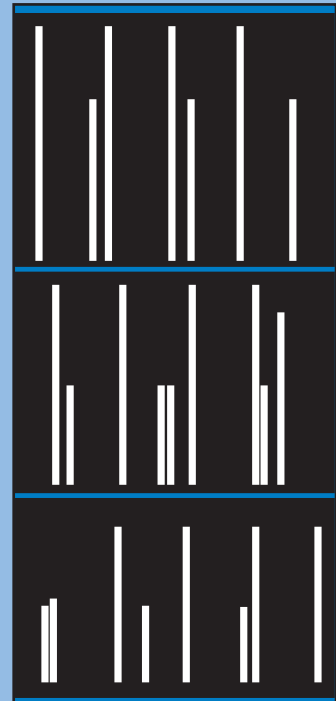


Fig.13 : La diode infrarouge émet des créneaux spécifiques à chaque bouton.

Conclusion

En télécommunication, la transmission des signaux se fait par modulation.

La transmission par modulation met en jeu :

- un signal à transmettre : le signal modulant de basse fréquence,
- une porteuse (onde électromagnétique) : le signal de haute fréquence à moduler.

La télécommunication d'un signal nécessite un canal de transmission, fréquence de la porteuse à laquelle est associée une bande de fréquence d'une largeur de l'ordre de grandeur du domaine des fréquences du signal transmis.

2.3- MODULATION D'UNE PORTEUSE SINUSOÏDALE

Soit un signal sinusoïdal de basse fréquence N (une tension électrique u par exemple), à transmettre sur une longue distance par un support électromagnétique. Son chronogramme de la figure 14a traduit l'évolution de :

$$u(t) = U_m \cos(2\pi Nt + \varphi),$$

où U_m est son amplitude et φ est sa phase initiale.

Ce signal va moduler la porteuse $u_p(t)$, signal sinusoïdal de haute fréquence N_p :

$$u_p(t) = U_{pm} \cos(2\pi N_p t + \varphi_p),$$

où U_{pm} est son amplitude et φ_p est sa phase initiale.

Son chronogramme est celui de la figure 14b.

La modulation de la porteuse consiste à faire varier son amplitude U_{pm} , sa fréquence N_p ou sa phase initiale par le signal à transmettre $u(t)$.

- Si U_{pm} varie en fonction de $u(t)$, on a une modulation d'amplitude (Fig.14c).
- Si N_{pm} varie en fonction de $u(t)$, on a une modulation de fréquence (Fig.14d). Dans ce cas, le signal modulé a une amplitude égale à celle de la porteuse, mais une fréquence qui varie au cours du temps.
- Si φ_p varie en fonction de $u(t)$, on a une modulation de phase dont l'étude est hors programme.

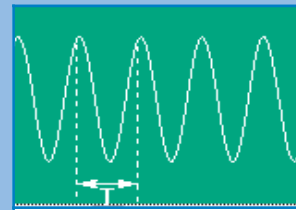


Fig.14a : Signal modulant

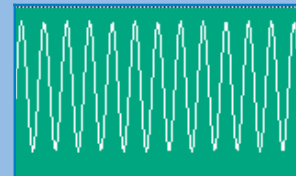


Fig.14b : Porteuse

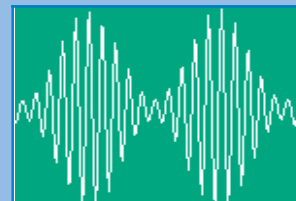


Fig.14c : Signal modulé en amplitude.

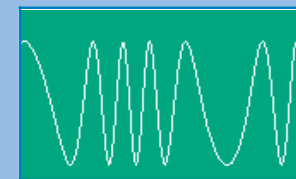


Fig.14d : Signal modulé en fréquence.

Conclusion

En télécommunication avec une porteuse sinusoïdale, la transmission d'un signal se fait par modulation, soit de son amplitude, soit de sa fréquence, voire de sa phase.

2.4- RÉCEPTION D'UN SIGNAL

En télécommunication, les signaux susceptibles d'être transmis simultanément sont généralement en très grand nombre. Mais, chacun d'entre eux est recherché pour être reçu tout seul.

Questions

1°) Tout récepteur de signal transmis par télécommunication (poste radio, téléviseur, téléphone fixe ou mobile...) doit être muni d'un oscillateur résonateur et d'un filtre passe bande entre autres. Expliquer le rôle de chacun de ces dispositifs.

2°) Le signal transmis étant modulé, que faut-il lui faire subir à la réception afin de l'identifier ?

En fait, afin de capter un seul des signaux transmis simultanément à un lieu donné, il faut accorder le circuit oscillateur du récepteur sur la fréquence N_p de sa porteuse pour qu'il entre en résonance.

Pour que la réception ne soit pas brouillée, il faut un filtre dont la bande passante englobe le canal de transmission du signal. Pour que le signal de basse fréquence soit perçu net tel qu'il a été émis à la source avant d'entrer en modulation, il faut le séparer de sa porteuse, c'est-à-dire, il faut réaliser la démodulation du signal (ou démoduler le signal) véhiculé entre l'émetteur et le récepteur. A cette fin, l'appareil récepteur doit être muni d'un dispositif approprié appelé démoduleur (voir étude détaillée au chapitre 13).

Conclusion

A la réception d'un signal transmis par modulation, sa perception nécessite, en plus du filtrage, une démodulation.

La démodulation est un procédé de traitement de signal modulé qui aboutit à la séparation du signal transmis de la porteuse.

3 LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

3.1- DÉFINITION

L'onde électromagnétique est une onde résultant de l'association d'un champ électrique et d'un champ magnétique, tous les deux de vecteurs champs sinusoïdaux, de même période, perpendiculaires l'un à l'autre en tout point et se propagent, dans toutes les directions sans nécessiter un support matériel.

3.2- CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES

Les ondes électromagnétiques se propagent dans le vide et dans les milieux matériels. Du fait qu'elles sont transversales, les vecteurs champs \vec{E} et \vec{B} qui leur sont associés varient en tout point perpendiculairement à la direction de propagation.

3.2.1- Célérité

La célérité (ou vitesse de propagation) d'une onde électromagnétique dépend du milieu de propagation.

Dans le vide, elle a sa valeur la plus élevée :

$$c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}.$$

Dans les milieux matériels, elle a comme expression :

$$v = \frac{c}{n},$$

le nombre n étant l'indice de réfraction absolu du milieu.

Remarque : l'indice de réfraction de l'air étant égal avec une bonne approximation à l'unité, la célérité des ondes électromagnétiques dans l'air est prise égale à leur célérité c dans le vide.

Autre exemple : l'indice de réfraction du verre est $n = 1,5$.
D'où, $v = 2 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

3.2.2- Période temporelle et fréquence

Les ondes électromagnétiques progressives et sinusoïdales sont caractérisées par leur période T , temps mis par une vibration pour se retrouver dans le même état.

Etant très petite, la période T peut avoir une valeur de l'ordre de 10^{-28} s (rayons γ).

La fréquence $N = \frac{1}{T}$ peut atteindre un milliard de milliards de gigahertz.

3.2.3- Période spatiale (ou longueur d'onde)

La longueur d'onde λ peut être définie comme étant la plus petite distance séparant deux points dans le même état vibratoire. C'est aussi la longueur λ parcourue par l'onde pendant une vibration complète, c'est-à-dire pendant la période temporelle T .

$$\lambda = \frac{v}{N} = v \cdot T, \text{ avec } v = \frac{c}{n}$$

Exemple

Une station radiophonique émet à la fréquence 102,5 MHz. Sachant que les ondes radio se propagent dans l'air avec la célérité $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$, sa longueur d'onde est :

$$\lambda = 2,926 \text{ m}$$

3.3- ONDES LUMINEUSES

C'est un domaine d'ondes électromagnétiques caractérisé par des longueurs d'onde comprises, dans l'air, entre $0,38 \mu\text{m}$ et $0,78 \mu\text{m}$.

Le spectre lumineux est caractérisé par les radiations :



Les radiations ultraviolettes et infrarouges constituent les parties invisibles du spectre.

3.4- ONDES HERTZIENNES

Les ondes hertziennes ou ondes radio sont des ondes électromagnétiques dont le domaine des fréquences s'étend de 300 kHz à 300 GHz.

Dans l'air ou dans le vide, elles ont des longueurs d'onde comprises entre 1 mm et 30 km.

Elles se propagent de deux façons :

- dans l'espace libre (l'air, le vide, etc),
- dans les lignes (câbles coaxiaux, fibres optiques, etc).

Elles sont utilisées comme porteuses pour différents types de transmission.

La figure 15 représente le spectre radiofréquence des ondes électromagnétiques. Les ondes électromagnétiques s'appliquent au quotidien dans tous les domaines :

le domaine médical, agricole, industriel...).

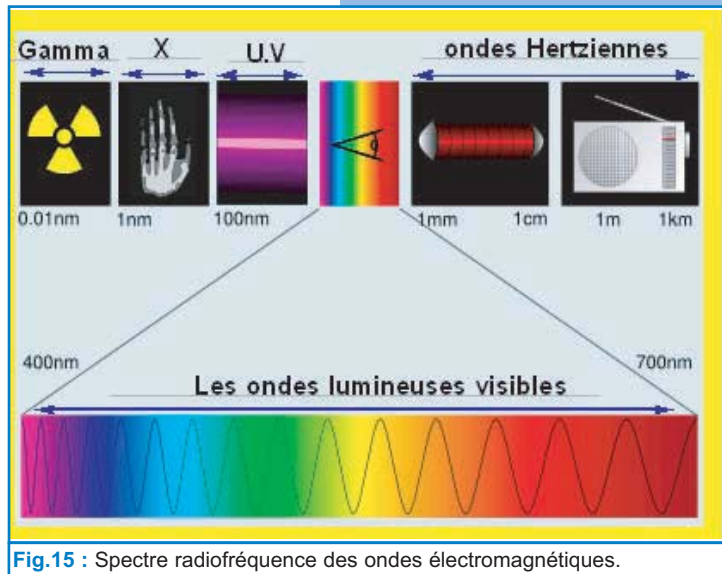


Fig.15 : Spectre radiofréquence des ondes électromagnétiques.

3.4.1- Gammes de fréquence des ondes Hertziennes

En télécommunication, les ondes hertziennes sont divisées en groupes dénommés communément VLF, LF, MF, HF, VHF, UHF, SHF et EHF.

Ce sont des abréviations relatives à la fréquence de l'onde hertzienne considérée.

Le tableau suivant résume les différentes gammes de fréquence et leurs domaines d'utilisation.

Désignation métrique	Longueur d'onde	Fréquence	Désignation courante	Domaine d'utilisation
Ondes millimétriques	1 mm - 10 mm	30 - 300 GHz	EHF : extra-hautes fréquences	Radio-astronomie
Centimétriques hyperfréquence	1 cm - 10 cm	3 GHz - 30 GHz	SHF : superhautes fréquences	- Satellite - Téléphone GSM
Décimétriques	1 dm - 10 dm	300 MHz - 3 GHz	UHF : ultrahautes fréquences	Télévision et radars
Métriques	1 m - 10 m	30 - 300 MHz	THF ou VHF : très hautes fréquences	Télévision et radio en FM
Décamétriques ondes courtes	10 m - 100 m	3 MHz - 30 MHz	HF : hautes fréquences	Radio à grande portée
Hectométriques petites ondes	100 m -1000 m	300 kHz - 3 MHz	MF : moyennes fréquences	Radio en modulation AM
Kilométriques grandes ondes	1 km -10 km	30 kHz - 300 kHz	BF : basses fréquences	Avions, navires, radiotélégraphie
Myriamétriques	10 km - 30 km	10 kHz - 30 kHz	VLF : très basses fréquences	Détresse en mer, radiotélégraphie

3.4.2- Propagation dans les milieux matériels

Au cours de leur propagation dans le vide ou dans un milieu matériel, les ondes hertziennes peuvent rencontrer un obstacle ou se trouver au niveau d'un autre milieu de propagation. De ces interactions onde-matière, il peut résulter les phénomènes d'absorption, de réflexion, de diffusion, de réfraction ou de dispersion. L'interaction des ondes hertziennes avec les couches atmosphériques dépend de la fréquence de l'onde et du milieu de propagation.

Les ondes métriques se propagent en ligne droite et peuvent contourner les obstacles de quelques mètres de dimension. Elles sont réfléchies sur les murs, les rochers...

Les ondes hertziennes de fréquences typiquement inférieures à 30 MHz (onde B de la figure 16) sont réfléchies par l'ionosphère (région de l'atmosphère comprise entre les altitudes 60 km et 800 km).

Les ondes de fréquences plus grandes traversent l'ionosphère (onde notée a). Ce phénomène a certaines conséquences :

- les ondes radio des gammes ondes courtes, ondes moyennes (ou petites ondes PO) et grandes ondes, se trouvent ainsi piégées entre l'ionosphère et la Terre sur lesquelles elles sont réfléchies.

- les ondes de fréquences supérieures traversent l'ionosphère. Il est donc nécessaire d'installer des relais de télévision qui réceptionnent ces ondes, les amplifient et les réémettent.

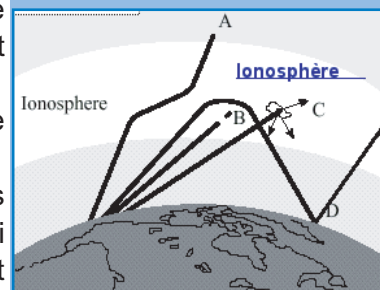


Fig.16 : Interaction des ondes hertziennes avec l'ionosphère

Question

Pour quelle(s) gamme(s) de fréquences, les satellites géostationnaires jouent-ils le rôle de relais en télécommunications ?

Les ondes **SHF** caractérisées par la gamme de fréquences (3 GHz - 30 GHz) se propagent en ligne droite et traversent l'ionosphère sans subir de réflexion. On profite de cette caractéristique et on envoie une onde directionnelle (à l'aide du paraboloïde) vers un satellite géostationnaire qui l'amplifie et la réémet en arrosant une grande surface sur la Terre.

Ce mode de transmission est adopté pour les téléphones mobiles GSM, la télécommunication intercontinentale, la télévision par satellite...

3.5- EMISSION ET RÉCEPTION D'ONDES HERTZIENNES

3.5.1- Antenne de Hertz

Une onde électromagnétique est produite par un courant électrique variable dans le temps. Donc, tout circuit électrique siège de courant variable peut produire une onde électromagnétique. Pour la détecter, il faut une antenne.

Le premier pionnier des antennes est le physicien Hertz.

Principe de fonctionnement

Une tige conductrice T_1 , de longueur L , est alimentée par un générateur produisant un courant de fréquence N . A proximité de cette tige, on met une deuxième tige T_2 identique à T_1 liée à un micro-ampèremètre ou un fréquencemètre (Fig.17).

On montre que la puissance rayonnée par la tige est optimale si sa longueur L vérifie la relation: $L = k \frac{\lambda}{2}$ avec $k \in \mathbb{N}^*$

Pour $k = 1$: la puissance rayonnée est maximale.

De même, le courant produit par l'onde électromagnétique dans

la tige réceptrice est maximal si : $L = \frac{\lambda}{2}$

On dit que l'on a une antenne demi-onde.

Remarque : il y a des antennes quart d'onde $L' = \frac{\lambda}{4}$

Questions

Sachant que les communications par GSM utilisent la gamme de fréquences (3 GHz - 30 GHz), montrer que l'antenne dont il faut munir les appareils de téléphone mobile peut être d'une longueur comprise entre 2,5 cm et 2,5 mm (Fig.18).

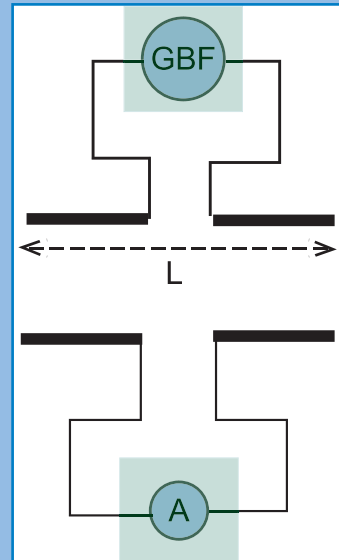


Fig.17 : Antenne de Hertz



Fig.18 : Téléphone GSM avec antenne non incorporée

Manipulation

Matériels : un GBF, deux fréquencemètres (multimètres numériques), deux antennes sur support.

Montage (Fig.19) : celui de la figure 17, mais en y remplaçant le microampèremètre par le fréquencemètre (1) ; le fréquencemètre (2) étant branché aux bornes du GBF.

Expérience 1

Pour chaque valeur de fréquence indiquée par le multimètre (2), on note celle indiquée par (1) et on constate qu'elles sont pratiquement égales.

Expérience 2

Pour chaque fréquence d'émission choisie, en éloignant lentement la tige T_2 de T_1 , on constate que le multimètre (1) affiche zéro à partir d'une distance D bien déterminée et qui est d'autant plus grande que la fréquence affichée par (2) est plus élevée.

Questions

1°) Qu'est-ce qui montre dans les expériences réalisées qu'il y a eu production d'une onde électromagnétique au niveau de la tige T_2 ?

2°) Comparer les fréquences des signaux émis et reçus.

3°) Préciser l'influence de la fréquence de l'onde électromagnétique sur sa portée.

Commentaire

Dans les expériences 1 et 2, l'indication d'une fréquence par le multimètre (1) égale à celle affichée par (2) relié à T_1 montre que celle-ci est une antenne émettant une onde électromagnétique se propageant sans changement de fréquence jusqu'à l'antenne réceptrice T_2 .

Les résultats de l'expérience 2 montrent que la portée d'une onde électromagnétique augmente avec sa fréquence.

Remarque

Dans le cas où le signal fourni par le GBF est de basse fréquence, l'absence d'indication par le fréquencemètre (1) n'infirme pas la production d'une onde électromagnétique par les courants de basse fréquence.

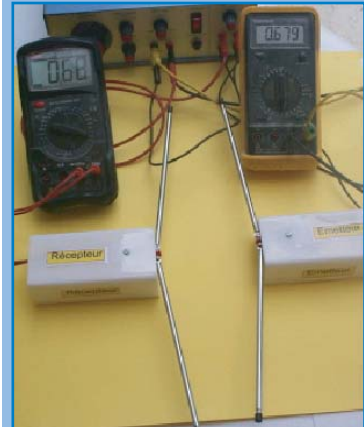


Fig.19 : Expérience de Hertz réalisée au laboratoire

Conclusion

Pour qu'il y ait production d'une onde électromagnétique, il faut que l'antenne émettrice soit d'une longueur égale à la moitié ou au quart de la longueur d'onde. Il en est de même pour l'antenne réceptrice. La portée des ondes électromagnétiques augmente avec leurs fréquences.

3.5.2- Antenne parabolique (paraboloïde)

Les antennes paraboloïdes (Fig.20) appelées communément antennes paraboliques sont réservées pour les émissions (SHF) dont la porteuse a une fréquence comprise entre 3 GHz et 30 GHz et dont la source est à l'infini (grande distance de 36000 km de la Terre) de telle façon que les surfaces équiphases sont des plans et non des sphères. La tête réceptrice se trouvant au foyer capte une puissance électromagnétique maximale.

Remarque

Pour la transmission et la réception des ondes électromagnétiques, il y a plusieurs autres types d'antennes.

- L'antenne de Yagi (Fig.21) est utilisée en transmission terrestre.
- Les antennes avec des bobines (Fig.22) sont utilisées par les militaires.



Fig.20 : Paraboloïde pour communication via satellite



Fig.21 : Aérien terrestre (antenne de Yagi)



Fig.22 : Antennes comportant une bobine transformant l'énergie magnétique en un signal électrique, utilisée par les militaires

L'essentiel

■ L'onde électromagnétique est une onde transversale qui se propage dans les milieux matériels à la célérité : $v = \frac{c}{n}$, où n est l'indice de réfraction du milieu et c est sa célérité dans le vide.

Dans l'air, comme dans le vide : $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

- L'onde électromagnétique est le support de transmission des informations en télécommunication.
- Le canal de transmission d'un signal est défini par la fréquence de sa porteuse et par une bande de fréquences englobant les siennes
- La télécommunication d'un signal est réalisée par modulation d'un signal de haute fréquence nommé porteuse.
- En modulation, le signal de basses fréquences à transmettre est le signal modulant et le signal transporté par la porteuse est le signal modulé.
- Les ondes lumineuses et les ondes hertziennes sont des exemples d'ondes électromagnétiques.
- Les ondes hertziennes sont les ondes électromagnétiques utilisées en télécommunication.
- L'onde hertzienne est générée au niveau d'un circuit électrique parcouru par un courant de fréquence élevée. Sa réception, comme son émission, nécessite une antenne.
- La portée d'une onde électromagnétique, et en particulier l'onde hertzienne, augmente avec sa fréquence.

Exercices



Exercice résolu

ÉNONCÉ

Les cumulonimbus (nuages d'orage) créent les conditions météorologiques favorables à l'accumulation de charges électriques et par conséquent à la création d'un condensateur géant.

Entre les plaques de ce condensateur naturel, se produit une étincelle produisant un éclair.

Cet éclair surchauffe la couche d'air qui subit une dilatation brutale engendrant le tonnerre.



1°) Quel est le type d'onde qui véhicule l'éclair et celui qui véhicule le tonnerre ?

2°) Sachant que la vitesse de propagation de la lumière est $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ et celle du son est $v = 340 \text{ m.s}^{-1}$, expliquer pourquoi on voit l'éclair, puis on entend le tonnerre t_0 secondes après.

3°) L'éclair peut produire des surtensions dans les lignes électriques de la STEG. Expliquer ces phénomènes.

Les ondes électromagnétiques produites par les nuages sont-elles lumineuses, hertziennes ou les deux ?

4°) Peut-on localiser la position de la décharge ?

5°) Montrer à l'aide d'une recherche documentaire que la couleur de l'éclair constitue une source d'informations pour les météorologues.



SOLUTION

1°) L'éclair est un signal lumineux. Donc, il fait partie des ondes électromagnétiques de célérité $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ dans l'air.

La variation brutale de pression d'un gaz produit une onde sonore (onde mécanique), d'où le tonnerre.

2°) Les ondes électromagnétiques se propagent à la célérité $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$, tandis que les ondes sonores à la célérité $v = 340 \text{ m.s}^{-1}$.

La célérité du son est trop petite devant celle de la lumière, d'où le décalage t_0 entre la réception des deux signaux.

3°) Grâce à l'énergie qu'elle transporte, l'onde électromagnétique produite par la décharge se propage dans les lignes conductrices de la STEG et se superpose au champ créé par la ligne. Il en résulte une surtension ou une chute de tension.

La lumière ne se propage pas dans les lignes. Il s'agit alors d'une onde hertzienne.

Or, on voit l'éclair. Il s'agit alors d'un signal lumineux.

Donc, la décharge produit deux ondes électromagnétiques, une onde lumineuse et une onde hertzienne.

4°) En chronométrant le temps t_0 séparant la perception de l'éclair de celle du tonnerre, on mesurera la distance d (entre le point de l'espace de la décharge et notre lieu d'observation).

$$d = c \cdot t_1 \text{ et } d = v \cdot t_2$$

$$t_2 - t_1 = t_0.$$

En remplaçant t_1 et t_2 par leur expression en fonction de d , on aboutit à :

$$d = t_0 \cdot \frac{c \cdot v}{c - v}$$

5°) La couleur de l'éclair est une information en météorologie.

- Couleur blanche : air sec.
- Couleur jaune : grande quantité de poussière.
- Couleur rouge : air humide, quantité d'eau abondante, ce qui signifie un jour pluvieux.
- Couleur bleue : présence d'une grande quantité de grêle.

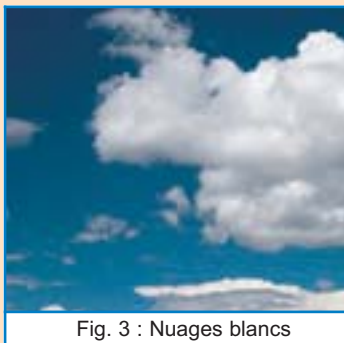


Fig. 3 : Nuages blancs



Fig. 4 : Nuages poussiéreux



Exercices à résoudre



Tests rapides des acquis

1

Items "vrai ou faux"

Evaluer les propositions suivantes par vrai ou faux.

- 1- La transmission des signaux n'est possible qu'avec les ondes électromagnétiques.
- 2- Les ondes métriques ont des fréquences variant de 30 à 300 MHz.
- 3- La couleur de la lumière peut constituer un canal de transmission des informations.
- 4- Les ondes électromagnétiques de basses fréquences se propagent mieux que les ondes électromagnétiques de hautes fréquences dans un milieu matériel.
- 5- La modulation est un canal de transmission.
- 6- La fréquence de la porteuse est un canal de transmission .
- 7- La lumière est une onde hertzienne.
- 8- Chaque station radio est caractérisée par la fréquence du signal modulant.
- 9- Toute onde électromagnétique est une onde hertzienne.
- 10- La célérité d'une onde électromagnétique est maximale dans le vide.
- 11- La télécommande d'un téléviseur émet des ondes électromagnétiques infra-rouges.
- 12- Les signaux émis par la télécommande sont modulés en fréquence.
- 13- Le modem d'un ordinateur est un modulateur et démodulateur de signaux.
- 14- La fréquence du signal modulant est supérieure à la fréquence de la porteuse.


2

Questions à Choix Multiples

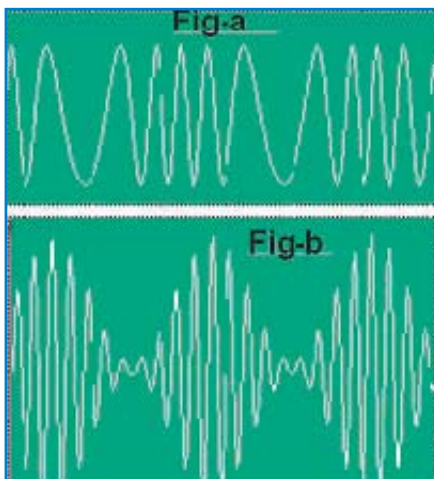
Préciser pour chacune des questions suivantes, la (ou les) proposition(s) juste(s).

- I- Les ondes hertziennes :
 - a- sont colorées.
 - b- ne se propagent pas dans le vide.
 - c- sont des ondes électromagnétiques.
- II- Sachant que Radio-Tunis a une fréquence de 92 MHz.
 - a- sa longueur d'onde est de 3,26 m.
 - b- sa période est de 10,8 ns.
 - c- elle émet des ondes centimétriques.
- III- La transmission par modulation peut consister en la modification de :
 - a- l'amplitude de la porteuse.
 - b- la fréquence du signal modulant.
 - c- la phase du signal modulé.
- IV- Le signal émis par une antenne est :
 - a- lumineux.
 - b- hertzien.
 - c- sonore.
 - d- électromagnétique.
- V- Les ondes hertziennes peuvent se propager :
 - a- dans les métaux.
 - b- dans les fibres optiques.
 - c- à travers l'ionosphère.
- VI- Les ondes hertziennes :
 - a- ont une fréquence plus élevée que celle des ondes lumineuses.
 - b- ont une longueur d'onde supérieure à celle de l'infra-rouge.
 - c- ont une fréquence inférieure à celles des ondes ultra-violettes.
 - d- constituent un canal de transmission en télécommunication.
- VII- En télécommunication, les antennes émettent :
 - a- des ondes électromagnétiques de même fréquence que le courant qui les produit.
 - b- des signaux sonores.
 - c- des ondes hertziennes sinusoïdales.

Exercices d'application

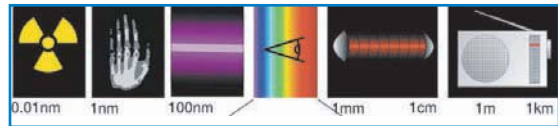
- 3** Deux émetteurs E_1 et E_2 transmettent des messages sous forme d'un nombre binaire à trois bits indiqué par les trois LED bleues du haut vers le bas. Si la Led est allumée, c'est l'état 1. Si elle est éteinte, c'est l'état 0. La LED jaune caractérise le message provenant de E_1 et la LED rouge caractérise celui parvenant de E_2 .
- 
- 1°) Quels sont les nombres binaires transmis par E_1 et par E_2 ?
 2°) Quel est le support de l'information ?
 3°) Quels sont les canaux de transmission pour chaque émetteur ?

- 4** 1°) Quelle est la différence entre la modulation d'amplitude et la modulation de fréquence ?
 2°) Préciser pour les signaux ci-dessous, celui qui est modulé en amplitude et celui modulé en fréquence tout en justifiant le choix fait.



- 5** En radiodiffusion, on utilise les ondes courtes entre autres.
- 1°) Quelle est la nature de telles ondes ?
 2°) Pourquoi les qualifie-t-on d'ondes courtes ?
 3°) Quelles longueurs d'onde peuvent-elles avoir dans l'air ?
 4°) En déduire le domaine de leurs fréquences sachant qu'elles se propagent dans l'air à la célérité $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

- 6** Le document ci-dessous représente le spectre des ondes électromagnétiques.



- 1°) Comparer la longueur d'onde du rouge à celle du bleu.
 2°) Comparer les fréquence des ondes hertziennes à celles des lumières ultraviolettes.

- 7** Un poste radio pour automobile peut capter avec une antenne de longueur L réglable, les stations qui émettent sur les fréquences allant de 87 MHz à 108 MHz.

- 1°) A quelle gamme d'ondes correspondent ces fréquences ?
 2°) S'agit-il là d'ondes porteuses ou bien des ondes à transmettre ? Justifier la réponse.
 3°) Calculer les longueurs d'onde correspondant aux limites 87 MHz et 108 MHz.
 4°) Sachant que pour une bonne réception, l'antenne doit être "quart d'onde", calculer la longueur que l'on doit donner à l'antenne pour capter nettement la fréquence 94,3 MHz de Radio Tunis «chaîne nationale». On donne : $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

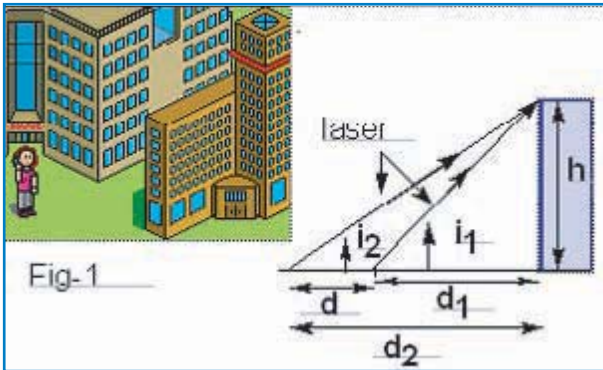
Exercices de synthèse

- 8** La photo de la figure ci-contre est celle d'une antenne parabolique.



- 1°) Rappeler ses caractéristiques .
 2°) Pourquoi l'émetteur se trouve-t-il dans le plan équatorial à une altitude de 36000 km de la Terre ?
 3°) Au cours d'une transmission en direct, d'un match de football par satellite, un joueur marque le but à l'instant $t = 89 \text{ min}$. A quel instant, les téléspectateurs verront-ils le but ? On donne $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.
 4°) Pourquoi, pour la même transmission par satellite et par voie terrestre, il y a un retard ?

9 Mesure de la hauteur d'un gratte-ciel par le laser



L'onde électromagnétique s'applique au quotidien en télémétrie (mesure à distance).

On dispose d'un laser rouge et d'un goniomètre (instrument de mesures d'angles) pour mesurer i_1 et i_2 et un mètre-ruban.

1°) Expliquer les différentes étapes pour mesurer h .

2°) Montrer que h vérifie la relation :

$$h = \frac{d}{\left(\frac{1}{\operatorname{tg} i_2} - \frac{1}{\operatorname{tg} i_1}\right)}$$

3°) Peut-on calculer la distance d_1 ?

4°) Quel est l'intérêt pratique de cette méthode ?

5°) Peut-on l'appliquer en astronomie ?

10 Étude de texte

L'oscillateur de Hertz

En 1887, Heinrich Hertz metta au point un système de deux dispositifs permettant d'émettre et de détecter des ondes électromagnétiques. Le premier dispositif qu'il a utilisé et qu'il a nommé "Excitateur" est constitué d'un conducteur rectiligne fermé sur une bobine inductive (B_1) et au milieu duquel est disposé un éclateur (ensemble de deux boules métalliques (P) et (Q) espacées d'un demi-centimètre). Autour du bobinage (B_1) enroulé sur un barreau de fer, il y a un bobinage (B_2) qui peut être fermé momentanément sur une pile avec un interrupteur à ressort. Comme résonateur, Hertz a utilisé un deuxième dispositif constitué d'une boucle métallique non fermée et placée à une dizaine de mètres de l'éclateur. A chaque ouverture de l'interrupteur, une étincelle surgit entre les boules (P) et (Q) et Hertz constata qu'en agissant sur l'orientation de la boucle, il peut apparaître simultanément une étincelle entre ses extrémités. Ainsi, Hertz metta expérimentalement en évidence la possibilité de produire une onde électromagnétique (onde prévue par le physicien anglais Maxwell).

Questions

1°) Qu'est-ce qui montre dans le texte qu'il y a eu dans l'expérience de Hertz, production d'une onde électromagnétique ?

2°) Identifier l'émetteur et le récepteur de l'onde électromagnétique mise en évidence par Hertz.

3°) Sachant que les étincelles qui se produisent dans l'éclateur de l'excitateur de Hertz résultent d'oscillations électriques amorties d'un circuit RLC série, identifier la bobine et le condensateur de ce circuit.

4°) Sachant que la longueur d'onde mesurée par Hertz était de 9 m et que la célérité d'une onde électromagnétique dans les conditions de son expérience est de $2,99 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$, calculer la fréquence de cette onde électromagnétique.

En savoir plus

TÉLÉCOMMUNICATION INFRA-ROUGE

Matériels : Une télécommande (n'importe laquelle), une diode électroluminescente, un circuit intégré 4011 (disposant de 4 portes logiques NAND) et un circuit intégré TSOP1736 (détecteur de signaux infrarouges et démodulateur pour une fréquence porteuse de 36 kHz).

TSOP1736 (Fig.1) est un circuit intégré à trois "pattes" qui doit être polarisé par une tension continue de +5V.

Entre la borne (-) et la sortie, on récupère le signal électrique produit par le rayonnement infra-rouge.

La figure 2 représente le montage de polarisation du circuit intégré TSOP1736 avec $R = 5\text{ k}\Omega$.

Expérience 1

- Réaliser le montage de la figure 2.
- Appuyer sur n'importe quel bouton de la télécommande pendant un temps très bref. Puis, appuyer une autre fois en regardant l'indication du voltmètre.

Question

- En appuyant sur l'un des boutons, quelle est l'indication du voltmètre ?
- En relâchant le bouton, quelle est la nouvelle indication ?

Interprétation

- En l'absence de signal infra-rouge, la tension de sortie du détecteur est +4.84 V (Fig.3a).
- En présence d'un signal IR, la tension de sortie est (+ 3,64 V) comme dans la figure 3b.

Conclusion

L'état de la diode infra-rouge est numérisé par le voltmètre.

- D'après le tableau ci-contre, on a obtenu une porte logique NON. Nous avons eu

Etat de la diode	Tension de sortie (V)	Etat logique de la sortie
1	+3,64	0
0	+4,84	1

une information de l'état de la diode par un support infra-rouge avec un canal de transmission défini par la valeur de la tension.

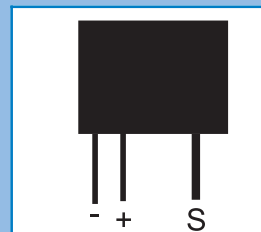
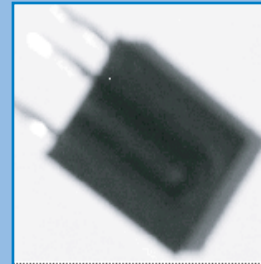


Fig.1 : TSOP

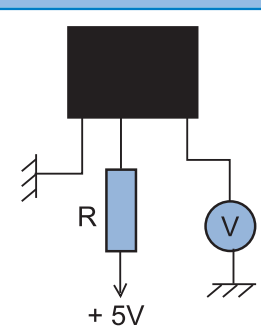


Fig.2 : Polarisation du TSOP

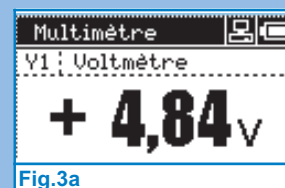


Fig.3a

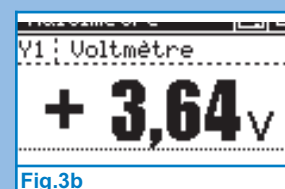


Fig.3b

Expérience 2

Au lieu du voltmètre, utiliser un oscilloscope à mémoire et appuyer sur n'importe quel bouton d'une façon continue.

Question

- Qu'observe-t-on ?
- Quelle est la forme du signal émis par la diode ?

Interprétation

Les signaux sont des successions d'états hauts et bas espacés au cours du temps. C'est le principe du code Morse (Fig.4).

Conclusion

Les signaux émis par la télécommande sont codés. Ce codage est propre à chaque bouton. Ainsi, par le signal infra-rouge, on a créé plusieurs canaux de transmission.

Expérience 3

On réalise l'expérience de la figure 5a avec une porte logique NAND (broches 1 et 2 sur les entrées ; broche 3 à la sortie). On applique le signal de sortie du TSOP aux entrées 1 et 2. La sortie de cette porte logique est reliée à une diode ordinaire.

Questions

- En l'absence de signal infrarouge, quel est l'état de la diode ?
- En appuyant d'une façon continue, quel est l'état de la diode ?

Interprétation

La porte logique NAND se comporte comme une porte logique simple NON dans le cas de la figure 5b.

Sa tension de basculement est de l'ordre de 4,5 V.

S'il n'y a pas de signal IR, la sortie du TSOP est de 4,84 V supérieure à 4,5 V, d'où l'entrée de la porte est à l'état haut et la sortie de la porte à l'état bas.

Mais, puisqu'il s'agit d'une porte NON, la sortie est à l'état haut et la diode s'allume.

C'est le cas contraire si la diode IR émet un signal : la diode est éteinte.

Question

Proposer une petite modification au niveau du montage de la figure 5a pour changer l'état de la diode :

- s'il y a un signal IR, la diode s'allume,
- s'il n'y a pas de signal IR, elle est éteinte.

Expérience 4

- Souder deux fils aux bornes de la diode infra-rouge.
- Appuyer sur l'un des boutons et visualiser le signal émis par la diode infra-rouge.

Questions

- Le signal est-il modulé ? de quel type de modulation s'agit-il ?

Interprétation

Le signal émis par la télécommande est modulé (Fig.6). La fréquence de la porteuse est de 36 kHz.

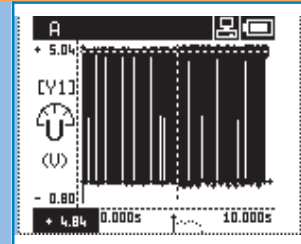


Fig.4 : Chronogramme

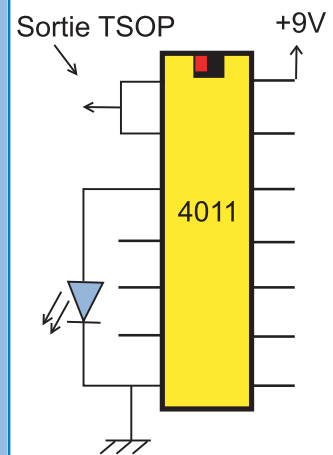


Fig.5a : Visualisation par la diode des états hauts et bas émis par la télécommande

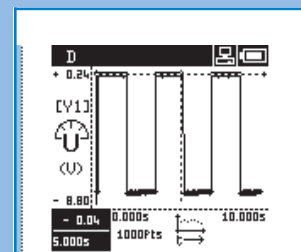


Fig.5b

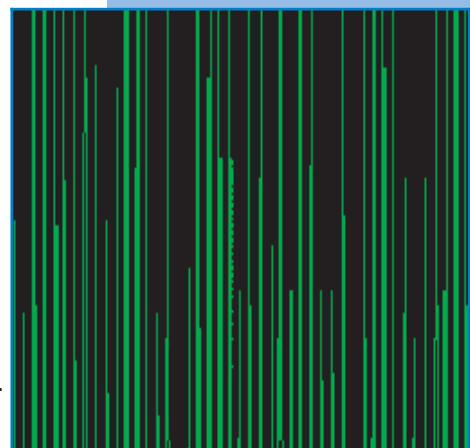


Fig.6 : Signal modulé

- ◆ Réaliser la modulation d'une tension sinusoïdale en amplitude.
- ◆ Mettre en évidence expérimentalement l'influence de la composante continue ajoutée à la tension modulante sur la qualité de la modulation.
- ◆ Calculer le taux de modulation d'un signal sinusoïdal.
- ◆ Réaliser la démodulation d'un signal électrique sinusoïdal modulé en amplitude.
- ◆ Mettre en évidence expérimentalement l'influence de la fréquence de l'onde électromagnétique porteuse du signal sur la démodulation de ce dernier.
- ◆ Réaliser la modulation d'une tension sinusoïdale en fréquence.

Prérequis

SAVOIR

- ◆ Caractériser une grandeur physique sinusoïdale par sa période, sa fréquence, son amplitude et sa phase initiale.
- ◆ Donner le symbole d'une diode, d'un condensateur...
- ◆ Définir la charge et la décharge d'un condensateur.
- ◆ Définir un filtre électrique.

SAVOIR FAIRE

- ◆ Reconnaître une grandeur physique sinusoïdale.
- ◆ Visualiser à l'oscilloscope bicourbe :
 - une tension électrique.
 - simultanément, deux tensions électriques.
- ◆ Mesurer à l'oscilloscope, les caractéristiques d'un signal périodique (période, amplitude...).
- ◆ Monter une diode.
- ◆ Réaliser un filtre CR passe haut, un filtre passe bas RC.