VERIFICATION EXPERIMENTALE
DE LA VALEUR
DE LA VITESSE DE LA LUMIERE

Sommaire

- Présentation et intérêt de la modulation
    - Intérêt de la modulation
    - Présentation de la modulation
        - → Principe de la modulation
        - → Modulation d'amplitude
        - → Modulation de fréquence
    - Schéma illustrant la différence entre les deux types de modulation
- Manipulation
    - Matériel nécessaire à la manipulation
    - Utilisation des émissions de radio RTL
- Exploitation des résultats
- Vérification théorique des résultats
- Index

But :

on cherche à retrouver la valeur de la vitesse des ondes électromagnétiques, en mesurant le temps qu'elles mettent pour parcourir une certaine distance terre-espace.

Principe : pour notre manipulation, on s'intéresse plus particulièrement à des ondes hertziennes :les ondes « radio » . Certaines radio émettent à la fois en A.M. et en F.M., et le trajet des ondes n'est donc pas le même pour ces deux modes d'émissions. Ayant déterminé la différence de marche des ondes , il nous suffit de déterminer expérimentalement le retard entre la réception en A..M. et en F.M..
Nous comparerons la valeur expérimentale ainsi trouvée à celle qui a été fixée en 1983.

Choix de la radio : il fallait trouver une radio qui émet à la fois en A.M. et en F.M. pour pouvoir calculer la différence de marche. Mais il faut aussi que les présentateurs parlent beaucoup car les plages de programme musicales ne sont pas favorables aux mesures (cf. plus loin).
Notre choix s'est porté sur R.T.L. qui émet en A.M. sur la fréquence de 234 Hz et en F.M. grâce au satellite géostationnaire TELECOM 2B.

1. PRESENTATION ET INTERET DE LA MODULATION

- **Intérêt de la modulation :**

L'oreille humaine est sensible à la plage de fréquence 20 Hz à 20KHz donc à la réception du signal il serait impossible de distinguer le signal émis de tout autre signal parasite encombrant la même fréquence.

De plus, une bonne réception du signal nécessiterait une antenne de taille très importante comme nous l'indique la formule empirique suivante $L=\lambda/4$ où L est la longueur de l'antenne nécessaire à la réception et λ la longueur d'onde du signal émis. Ainsi pour une fréquence de 1 KHz il faudrait une antenne de 75 km.

- **Présentation de la modulation** :

Tout repose sur le problème de la transmission de l'information entre un émetteur et un récepteur.
Il est impossible de transmettre directement l'information sur un câble coaxial longue portée , comme on peut le faire sur de courtes distances.
Il est donc nécessaire de véhiculer cette information par l'intermédiaire d'une onde de haute fréquence que l'on appelle **signal porteur** ou **porteuse**.

La porteuse est en général de la forme $P_m \cos(\omega_m t + \varphi_m)$ .L'information ,de fréquence très inférieure à celle de la porteuse, pourra alors être « incluse » dans le signal porteur à condition qu'elle perturbe de manière contrôlé l'une de ses caractéristiques :
- soit l'amplitude P_m de la porteuse
- soit sa pulsation ω_m, ce qui revient a changer sa fréquence.

L'une de ces grandeurs est donc modifiée à l'image de l'information :c'est ce qu'on appelle la **modulation**.
Le signal obtenu s'appelle **porteuse modulée** : c'est elle qui se propage dans le câble.
Selon que la modulation agit sur l'amplitude de la porteuse ou sur sa fréquence on parle de :

- modulation d'amplitude (AM)
- modulation de fréquence (FM)

La démodulation est l'opération inverse qui consiste à extraire en bout de ligne , l'information de la porteuse modulée.

plus précisément…..

- <u>Modulation d'amplitude</u> :

Le signal modulant est du type $u(t)= U_0 + U_m.\cos(\omega_1 t)$ avec ω_1 faible.
On prend le signal porteur de la forme suivante : $p(t)=P_m.\cos(\omega_2 t)$ avec $\omega_2 >> \omega_1$.

Et si S(t) est le signal de sortie :

$S(t) = u(t) . p(t).k$ où k est une constante réel.

$S(t) = k.(U_0 + U_m.\cos(\omega_1 t)) .(P_m.\cos(\omega_2 t))$

$S(t) = k.U_0.V_m.[\cos(\omega_2 t)] . [1+(U_m/U_0).\cos(\omega_1 t)]$

On a donc $\boxed{S(t)= A. [\cos(\omega_2 t)].[1+m.\cos(\omega_1 t)]}$ où m représente le taux de modulation. On disposera d'une bonne modulation si $U_m \leq U_0$.

- <u>Modulation de fréquence :</u>

L'amplitude d'un signal modulé en amplitude est souvent modifiée par les parasites du aux interférences avec les autres stations émettrices.

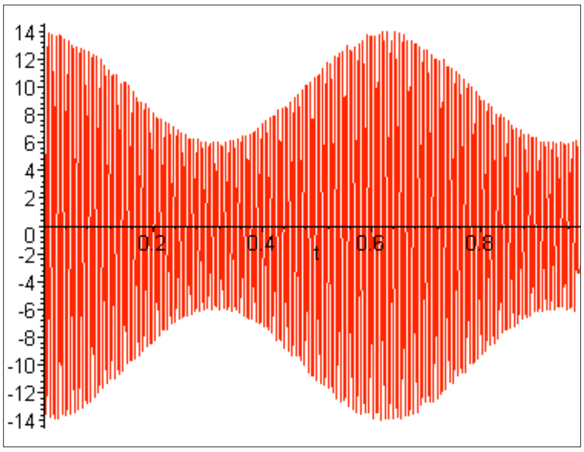
On module la fréquence du signal en laissant son amplitude constante. On fait varier la fréquence du signal porteur en fonction du signal u(t) que l'on désire transmettre.

$F(t) = F_0 + k.u(t)$

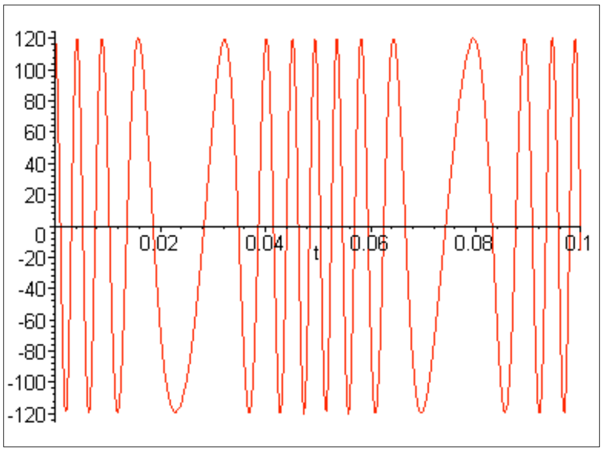
On obtient en signal de sortie $\boxed{S(t)=A_0.\cos(2\pi.F_0.t + \beta.\sin(2\pi.f(t)))}$ où β est l'indice de modulation soit $\beta = \dfrac{\Delta f}{f}$ où Δf est l'excursion en fréquence.

- <u>Schéma illustrant la différence entre les deux types de modulation.</u>

<u>*Modulation d'amplitude :*</u>



<u>*Modulation de fréquence :*</u>



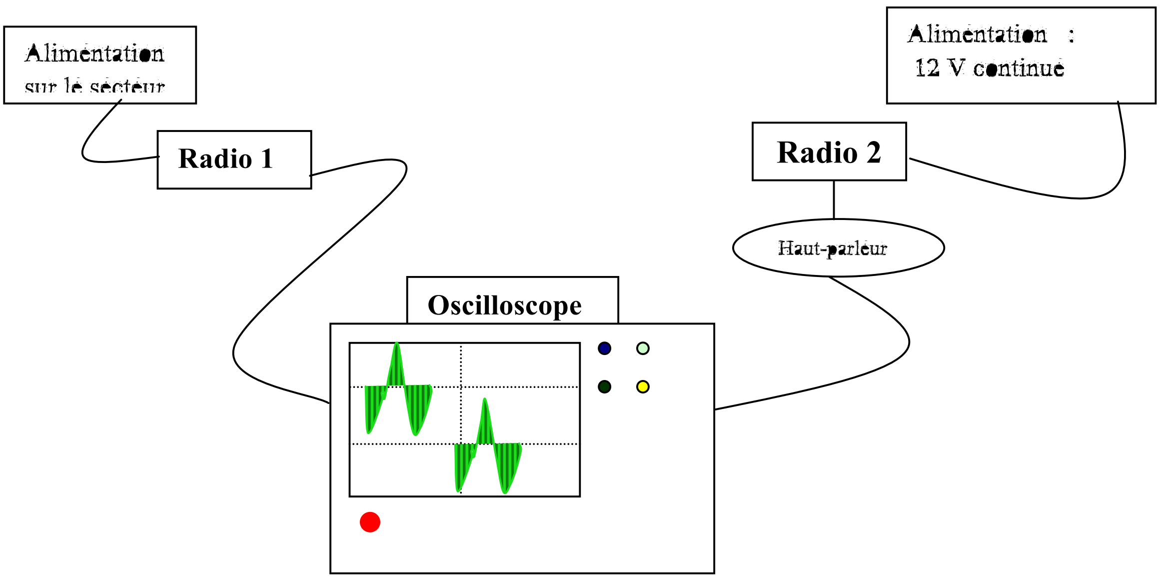
2. MANIPULATIONS :

- **Matériel nécessaire** :

  - deux postes de radio (l'un recevant en A.M., l'autre recevant en F.M.)
  - un oscilloscope numérique à mémoire, relié à une imprimante
  - des fils de jonction
  - du matériel de soudure
  - un haut-parleur

- **Schéma du dispositif :**

Dispositif du montage :



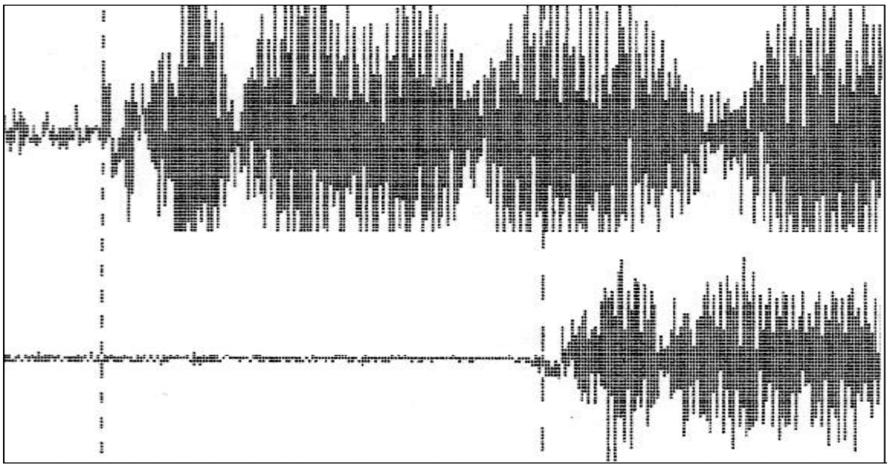
Précautions à prendre quant à la manipulation :

- séparer convenable ment les postes de radio de l'oscilloscope, j'ai remarqué, en effet, des interférences lorsqu'on ne séparait pas les postes. Ces interférences rendent évidemment les mesures difficilement exploitables.

Explication de ces interférences :

L'oscilloscope émet des interférences rendant les mesures difficiles :il a donc été nécessaire de séparer les postes de radio de l'oscilloscope.

• Ces manipulations nous ont permis de faire 23 mesures permettant une mesure directe du Δt et 2 autres illustrant les difficultés à prendre des mesures quand le programme radio est une chanson: seul un dialogue permet de réaliser des mesures exploitables.

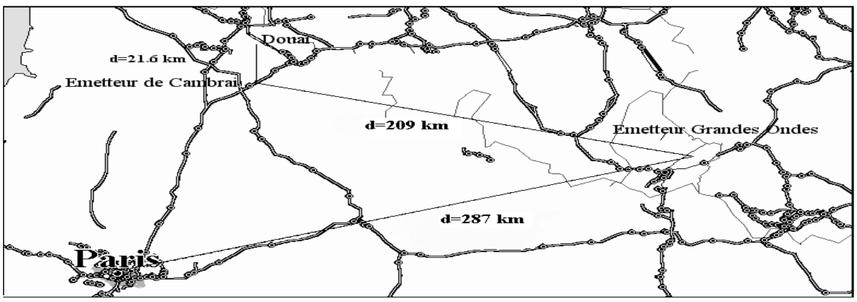


- **Utilisation des émissions de radio RTL**

•**EN AM** :la fréquence utilisée est de 234 kHz .RTL nous a communiqué le trajet des ondes pour ce type d'émission :

- le signal part de leur STUDIO PARISIEN (48°52'03'' de latitude, 02°18'32''de longitude)
- à destination de leur émetteur situé au LUXEMBOURG (06°19'16'' de longitude E, 49°43'50'' de latitude N),
- le signal est alors envoyé vers l'émetteur de TILLOY-LEZ-CAMBRAI (03°13'27''de longitude E, 50°12'05'' de latitude N)
- puis redistribué sur DOUAI (50°22' de latitude, 3°03'90'' de longitude E).

Le logiciel « Autoroute Express » nous donne la carte suivante qui illustre le trajet des ondes :



Le logiciel « Atlas Mondial Encarta » nous a permis de calculer les distances exactes entre les villes que nous avons inscris sur la carte donc les ondes parcourt une distance de 496 km.

• **EN FM :** les ondes sont émises du studio de Paris à destination du satellite TELECOM 2B se situant sur l'orbite géostationnaire 5° Ouest. Ce dernier renvoie le signal directement sur Douai.

Nous proposons donc de calculer la distance parcourue par le signal.

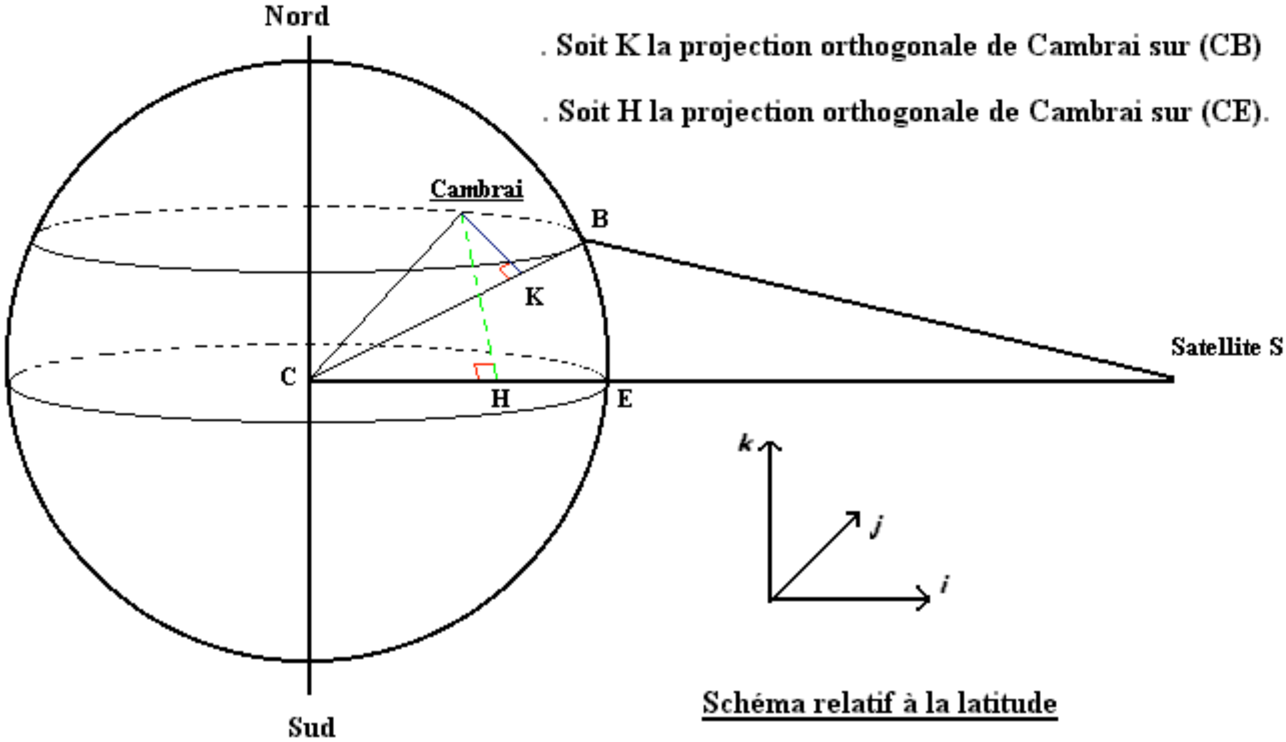


Schéma relatif à la latitude

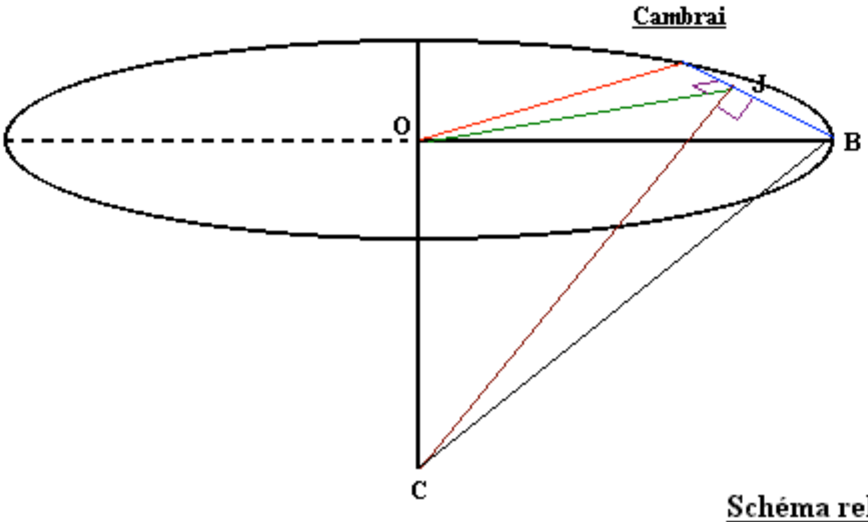


Schéma relatif à la longitude

Nous noterons dans les calculs qui suivent :

- C le centre de la Terre.
- B le point d'intersection entre le méridien de Greenwich et le parallèle sur lequel se trouve Cambrai. Le point B se trouve donc à la longitude 0°.
- E repère l'intersection entre le méridien de Greenwich et l'équateur :E se trouve donc à la latitude 0° et à la longitude 0°.

K représente la projection orthogonale de Cambrai sur la droite **(CB)** et H la projection orthogonale de Cambrai sur la droite **(CE),** J la projection orthogonale du point O sur la droite **Cambrai - point B**.

• Cambrai sera repéré par le point M.

Soit $(\overrightarrow{CB}, \overrightarrow{CE}) = \lambda$ ainsi λ représente la latitude de Cambrai.

Soit $(\overrightarrow{CB}, \overrightarrow{CM}) = \beta$.

Soit $(\overrightarrow{OB}, \overrightarrow{OM}) = \alpha$.

Pour déterminer l'angle α , il nous suffit d'ajouter la longitude de Cambrai et celle du satellite ce qui donne en faisant une somme **algébrique** $\boxed{\alpha = 8°13'27''}$.(de même pour le cas de Paris)

$$\text{Or} \quad \overrightarrow{CM} = R.\cos(\lambda)\ \vec{u}_\alpha + R.\sin(\lambda).\vec{k}$$

$$\overrightarrow{CM} = R.\cos(\lambda)\ (\cos(\alpha).\vec{i} + \sin(\alpha).\vec{j}\ ) + R.\sin(\lambda).\vec{k}$$

donc le point M a pour coordonnées dans le repère (Oijk) :

$\boxed{(R.\cos(\lambda).\cos(\alpha) / R.\cos(\lambda).\sin(\alpha) / R.\sin(\lambda))}$

Les coordonnées du point S représentant le satellite sont $\boxed{(h+R / 0 / 0)}$.

Soit en utilisant la norme du produit scalaire défini sur R_3, il vient :

$MS^2 = [\ h- R.\cos(\lambda).\cos(\alpha)]^2 + (R.\cos(\lambda).\cos(\alpha))^2 + (R.\sin(\lambda))^2$.

Soit encore $MS^2 = [\ h - R.\cos(\lambda).\cos(\alpha)]^2 + R^2.(1-\cos^2(\alpha).\cos^2(\lambda))$

<u>Récapitulatif :</u>
MS := distance d'un point quelconque du globe au satellite.
λ := latitude de la ville
α := longitude de la ville + 5

Alors :

$$\boxed{MS = \left[R^2 (1 - \cos^2(\alpha) \cos^2(\lambda)) + (h - R.\cos(\lambda).\cos(\alpha))^2 \right]^{½}}$$

Cette formule est valable ce quelque soit le point M d'où :

- Distance (Paris- Satellite) = <u>38 279.45 km</u>
- Distance (Cambrai- Satellite) = <u>38 412.07 km</u>

<u>Remarque</u> : on sait que h=35 760 km puisque c'est l'altitude des satellites géostationnaires.

3. <u>EXPLOITATION DES RESULTATS</u>

- **<u>Tableau de mesures :</u>**

mesures	1	2	3	4	5	6	7
temps relevé	264 ms	264 ms	276 ms	264 ms	264 ms	260 ms	268 ms
8	9	10	11	12	13	14	15
260 ms	264 ms	268 ms	258 ms	260 ms	264 ms	262 ms	260 ms
16	17	18	19	20	21	22	23
276 ms	264 ms	264 ms	268 ms	260 ms	262 ms	268 ms	260 ms

Ce qui nous donne comme valeur moyenne 264 ms

- **Détermination de la valeur de c :**

Le trajet suivi par les ondes en FM est donc évalué à 76 669.96 km d'où une différence de marche des ondes de $\Delta d = 76\,173.96$ km.
Par conséquent, ayant $\Delta t = 264$ ms , on a :

$$\boxed{c.\Delta t = \Delta d}$$

Soit **$c = 289.122.809\ m.s^{-1}$**
En première approche

Sachant que la valeur de c est de 299 792,458 km.s $^{-1}$, cela nous donne un écart relatif de 3.5%.

❖ **Calcul des incertitudes**

Le calcul d 'incertitudes réalisé sur Maple montre que la valeur de c ne peut être avec une telle expérience approchée qu'avec une précision de 4.6 % et donc la mesure de c est faite à ± 13.790.728 m/s. Par conséquent le résultat de notre expérience est :

$$\boxed{c = 289 \pm 14\ .\ 10^6\ m.s^{-1}}$$

Dans ce calcul d'incertitude, nous avons du évalué les incertitudes relatives aux différentes données expérimentales :

- Concernant les coordonnées des sites intervenant dans la trajet des ondes, l'incertitude sur la longitude et la latitude a été évalué à 1 secondes d'angle.
  Cette hypothèse montre que le trajet des ondes est évalué pour la liaison Paris-Satellite à 129 mètres et pour le trajet Satellite-Cambrai à 131 mètres.
- La plus grande incertitude repose sur la mesure de l'intervalle de temps séparant la réception du signal en modulation d'amplitude et celui en modulation de fréquence puisque sa mesure se fait par simple lecture à l'aide des curseurs de l'oscilloscope utilisé. Nous avons par conséquent évalué l'incertitude sur cette mesure en prenant l'écart à la moyenne **le plus important** dans notre échantillon de mesure.
- Puisque le trajet en modulation d'amplitude est de l'ordre de quelques centaines de kilomètres devant quelques milliers de kilomètres pour le trajet des ondes FM, nous avons considéré qu'il n'était pas nécessaire de prendre en compte l'incertitude portant sur la mesure de la distance parcourue en modulation d'amplitude.

Intérêt de cette méthode de mesure.

L'intérêt de mesurer la vitesse de la lumière apparaît clairement en 1983, année charnière dans la physique puisque celle-ci verra apparaître une nouvelle définition du mètre relégué au rang d'unité dérivée et remplacé par une nouvelle unité fondamentale, la vitesse de la lumière dans le vide.

Le mètre a connu 4 définitions successives jusqu'à aujourd'hui correspondant aux différents progrès technologiques.

↪Première définition légale du mètre adoptée en 1801 sous la forme suivante : « *Le mètre est la dix millionième partie de la distance du Pôle à l'Equateur* ».

➾**Historique :** Delambre et Méchain sont les Pères fondateurs du système métrique et ils vont mesurer de 1792 à 1799 l'arc de méridien qui va de Dunkerque à Barcelone, ce qui représente une différence de latitude d'environ 10°. La méthode utilisée est la triangulation. Sur leurs indications, Jannetti forge une règle en platine coorespondant à 0.5 130 740 toise et cette règle est déposée aux Archives Nationales.

↪ Seconde définition datant de 1875 : « *Le mètre est la longueur, dans les conditions normales (0° C, 760 mmHg), d'un étalon de platine irridié déposé au pavillon de Breteuil à Sèvres* ».

↪ Troisième définition du mètre adoptée en 1960 : « *Le mètre est la longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux 2 p_{10} et 5 d_5 de l'atome de Krypton 86.* »

➾ **Historique** : Cette définition s'explique par la tentative de vérification de Michelson entre le mètre étalon et la longueur d'onde de la raie rouge du cadmium. Expérience qui fut perfectionné par Perrot et Fabry en 1913. La qualité du résultat est du à différents perfectionnements par diminution de la température et l'utilisation du krypton 86.

↪Quatrième définition adopté en 1983 : « *Le mètre est la distance parcourue par la lumière dans le vide en un temps égal à 1/299 792 458 seconde* ».

➾ **Historique :** Tout s'explique par l'avènement du laser. On se base sur le laser Hélium-Néon et sur la formule $\lambda = c.T$ sachant que la mesure de la longueur d'onde de ce laser peut se faire par une méthode interférométrique dans le méthane. Cette mesure est très difficile à réaliser puisqu'il s'agit de comparer la longueur d'onde située dans l'infrarouge(3.392 µm) à la longueur d'onde de la lampe du krypton 86 devenu étalon du mètre. On évalue $\lambda = (3\ 392\ 231{,}4 \pm 0.013)$ **pm.** La mesure de fréquence est *a priori* est très difficile car il faut comparer la fréquence du laser de l'ordre de 9.10^{13} hertz à celle de l'horloge atomique de l'ordre de 9.10^{9} hertz. Après avoir surmonté cette difficulté, on évalue $\nu = (88\ 376\ 181\ 627 \pm 50)$ **kHz.** On a pu évaluer $\boxed{c = 299\ 792\ 458 \pm\ 1{,}2\ m.s^{-1}.}$

On peut citer les méthodes de
- Fizeau 1849, méthode de la roue dentée
- Michelson 1879, méthode du miroir tournant.
- Bergstrand 1950, méthode de la cellule de Kerr
- Froome 1954, méthode de l'interféromètre hyperfréquence qui donna le meilleur résultat correspondant à l'apothéose de la période classique avec c= 299 792,5 ± 0,4 km/s.

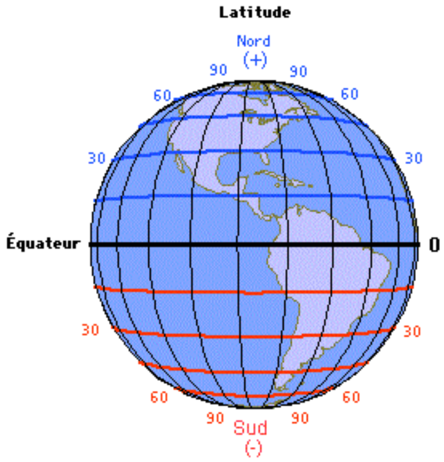
Exemple :

« *Professeur à l'École polytechnique (1863), Fizeau est le premier à mesurer la vitesse de la lumière sans faire appel aux observations astronomiques (1849).*
En employant une roue dentée tournant à grande vitesse pour fabriquer des impulsions brèves, Fizeau peut utiliser une distance assez courte (celle séparant le belvédère de sa maison de Suresnes et la fenêtre d'une maison de Montmartre : 8 km) pour déterminer la vitesse de la lumière. Il applique cette méthode à la mesure de la vitesse dans un milieu en mouvement (l'eau) et établit la loi de composition **»(Encyclopédie Universalis).**

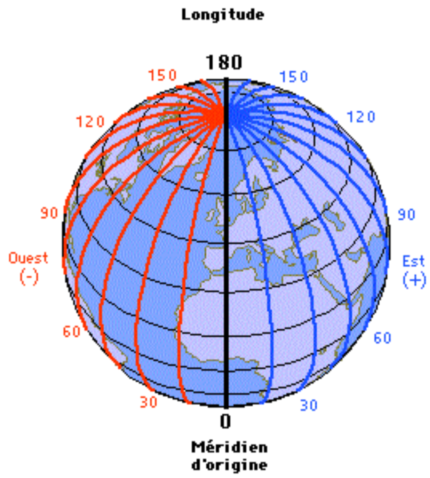
L'intérêt de la méthode que nous avons utilisée est que l'ensemble des mesures se fait sur une différence de marche de 70 000 km alors que l'ensemble des expériences de l'époque classique se faisaient sur des distances très courtes : ainsi Fizeau fit ces mesures sur une distance de 8 kilomètres. Cela nous permet d'avoir une précision relativement bonne avec un dispositif expérimental des plus simples.

INDEX :

Latitude : distance angulaire d'un lieu à un point, mesuré de 0 à 90 ° sur le méridien.



Longitude : distance angulaire que forme le plan du méridien de ce lieu avec le plan du méridien de Greenwich (pris comme origine), mesuré 0 à 180°.



Géostationnaire (satellite): satellite dont la position par rapport à la terre ne varie pas.

Ce satellite se situe à une altitude de 36570 km, résultat que l'on peut établir à partir de la relation fondamentale de la dynamique.

Le satellite est simplement soumis à une force de gravitation imposée par la Terre et dont la formule est donnée par la loi de Newton soit:

$$\boxed{F(1\rightarrow 2)=K.M_T.M_{satellite}/R^2.}$$

La RFD nous donne donc :

$$M_{sateliite}a = K.M_T.\ M_{satellite}/R^2.$$

Soit $\boxed{a = K.M/(R+h)^2}$

En supposant que la trajectoire du satellite est circulaire, la formule de Frenet relatif à l'accélération nous donne $\boxed{a = V^2/(R+h)}$

D'où la formule : $\dfrac{V^2}{(R+h)} = \dfrac{K.M}{(R+h)^2}$

Soit $(R+h).w = \dfrac{K.M}{(R+h)^2}$

Et par conséquent on a $\boxed{h = \sqrt[3]{\dfrac{K.M}{w^2}} - R}$

Onde : déformation d'un milieu fluide qui se propage à partir d'un point.

Onde électromagnétique (OEM): couple de champ électrique (et magnétique (qui se propagent à la vitesse c =299 792 458 $m.s^{-1}$ dans le vide. Une OEM oscille dans le temps, en un point fixé de l ' espace, il faut se représenter ses champs E et B comme rapidement variables (= champs vibrants)

Les ondes radio sont des OEM dont la fréquence est comprise entre 103 et 1010 Hz .

Onde porteuse : onde radio pouvant servir à transporter des signaux modulés. Les signaux du programme à moduler (audio, vidéo, etc.) sont incorporés à la porteuse par modulation de fréquence ou modulation d'amplitude.
L'onde porteuse est en général maintenue à une fréquence fixe par l'émetteur et est détectée dans le récepteur par un circuit résonant sur la fréquence porteuse. Une message est transmis en modifiant l'amplitude de l'onde porteuse ou sa phase, proportionnellement au signal de transmission voulu. Si l'amplitude est modifiée, on obtient une modulation d'amplitude. Si l'on modifie la phase de l'onde, on obtient une modulation de phase.