

## Mesure de la vitesse des ondes électromagnétiques

par Georges BERNI  
Lycée René Char - 84000 Avignon

---

Avant de développer ce travail, je tiens à exprimer mes remerciements à J.-C. PIVOT, du Lycée Le Castel, à Dijon, pour son article du B.U.P. n° 759, intitulé : «Mesure directe de la vitesse de la lumière».

Il s'agit de déterminer la vitesse des ondes électromagnétiques en mesurant l'intervalle de temps correspondant à la différence de marche d'une même émission radio, en A.M. et en F.M. via un satellite géostationnaire. On en déduit alors la vitesse des ondes radios, de nature électromagnétique, comme la lumière.

J.-C. PIVOT, qui a mis au point et réalisé cette expérience à Dijon, utilise les émissions de la station R.T.L. dont les studios sont situés au Luxembourg.

La station R.T.L. émet directement en A.M. sur 234 kHz et en F.M. par le relais du satellite géostationnaire Télécom 2B (5° Ouest) avec des fréquences variant suivant le lieu de réception.

Dans la région Sud-Est, les émissions de R.T.L. sont mal reçues en A.M., à cause de l'éloignement de l'émetteur et suivant la situation du récepteur.

C'est le cas du Lycée René Char, où l'on capte correctement R.T.L. en F.M. sur 101.4 Mhz, mais de façon très brouillée R.T.L. en A.M., sur 234 kHz.

Il fallait donc trouver un émetteur mieux adapté à la région Sud-Est.

## 1. UTILISATION DES ÉMISSIONS DE RADIO MONTE-CARLO (R.M.C.)

R.M.C. émet, comme R.T.L., simultanément en A.M. et en F.M. par l'intermédiaire du satellite Télécom 2B.

Une même émission partant des studios de Monte-Carlo est transmise :

– *en A.M.* : fréquence 216 kHz. Un réémetteur très puissant est situé sur le plateau de Valensole (Alpes de Haute-Provence).

– *en F.M.* : R.M.C. utilise le système Numéris des Télécom pour transmettre par Paris, puis Mulhouse, où se situe le réémetteur qui envoie les signaux hertziens au satellite Télécom 2B. Celui-ci les retransmet sur une fréquence adaptée, suivant la réglementation de la F.M., vers chaque ville ou région cible.

Pour Avignon : 104.4 Mhz et pour Marseille : 104.3 Mhz,

## 2. LONGUEUR DES TRAJETS ENTRE L'ÉMETTEUR ET LE RÉCEPTEUR

### 2.1. Longueur du trajet Monte-Carlo - Valensole - Avignon, en A.M.

Une évaluation sur une carte donne environ :  $d_1 = 200$  km.

### 2.2. Longueur de trajet Monte-Carlo - Paris - Mulhouse - Satellite - Avignon, en F.M.

#### 2.2.1. Évaluation de la «longueur de marche» Monte-Carlo - Paris - Mulhouse

La transmission des signaux s'effectue par câbles. La célérité d'une onde électromagnétique dans un milieu quelconque s'écrit :

$$c = Co/n \quad \text{avec} \quad n : \text{indice du milieu}$$

D'autre part, on sait que :  $n = \varepsilon^{\frac{1}{2}}$  avec  $\varepsilon$  : permittivité relative du milieu.

La permittivité dépend de la nature de l'isolant. On peut dans ce cas la considérer voisine de deux. La célérité des ondes électromagnétiques est alors de l'ordre de 220 000 km/s dans un câble.

Cela entraîne une «longueur de marche» minimale de l'ordre de **1 000 km**.

2.2.2. Calcul de la distance Mulhouse - Satellite

Coordonnées :

- Mulhouse (M) - latitude : 48° Nord, longitude : 5° Est,
- Satellite Télécom 2B(S) : longitude : 5° Ouest.

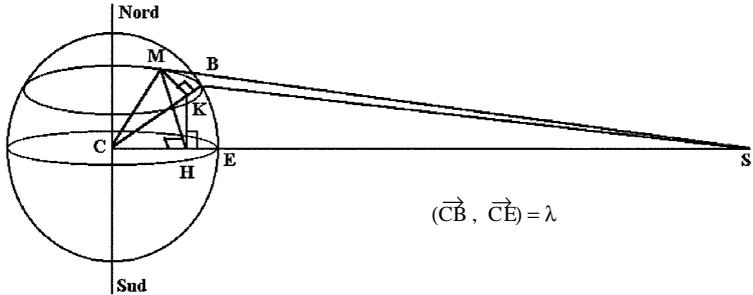


Figure 1

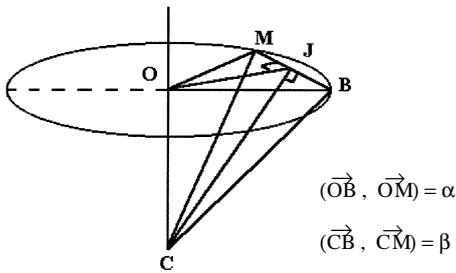


Figure 2

2.2.3. Expression et calcul de l'angle  $\beta$

$$(\vec{CB}, \vec{CM}) = \beta$$

$$(\vec{OB}, \vec{OM}) = \alpha$$

Angle du dièdre formé par les plans méridiens passant par Mulhouse (M) d'une part, le satellite géostationnaire (S) d'autre part.

$\alpha$  = longitude de Mulhouse + longitude du Satellite (en valeur arithmétique) ici  $\alpha = 5 - (-5) = 5 + 5 = 10^\circ$ .

$$(\vec{CB}, \vec{CE}) = \lambda \quad \text{latitude de Mulhouse}$$

$$CM = CB = CE = R \quad \text{rayon terrestre}$$

$$OM = OB = R \cdot \cos \lambda$$

$$MB = 2 MJ = 2 R \cdot \cos \lambda \cdot \sin (\alpha/2)$$

$$MJ = JB = R \cdot \cos \lambda \cdot \sin (\alpha/2)$$

Évaluons maintenant l'angle  $\beta$  :

$$\sin (\beta/2) = JB/CB = \cos \lambda \cdot \sin (\alpha/2)$$

d'où  $\beta/2 = \text{Arc sin} [\cos \lambda \cdot \sin (\alpha/2)]$

$$\beta = 2 \text{ Arc sin} [\cos \lambda \cdot \sin (\alpha/2)]$$

Pour Mulhouse :

$$\alpha = 10^\circ \quad \lambda = 48^\circ \quad \beta = 2 \text{ Arc sin} [\cos 48^\circ \cdot \sin (10^\circ/2)] = 6,7^\circ$$

$$\beta = 6,7^\circ$$

#### 2.2.4. Expression et calcul de la distance Mulhouse - Satellite

Les plans (CBM) et (CBE) sont orthogonaux.

Soit K la projection orthogonale de M sur (CB).

Soit H la projection orthogonale de M sur (CE).

(MK) orthogonal au plan (CEB)

donc (MK) orthogonal à (CH)  $\Rightarrow$  (CH) orthogonal à (HK)

(CH) orthogonal à (MH)

Alors :  $CK = CM \cdot \cos \beta = R \cdot \cos \beta$

$$CH = CK \cdot \cos \lambda = R \cdot \cos \beta \cdot \cos \lambda$$

$$MH^2 = CM^2 - CH^2$$

$$\text{d'où } MH^2 = R^2 - R^2 \cdot \cos^2 \beta \cdot \cos^2 \lambda = R^2 (1 - \cos^2 \beta \cdot \cos^2 \lambda)$$

$$\text{Avec : } \quad \quad \quad ES = h$$

$$HS = h + R - CH = h + R (1 - \cos \beta \cdot \cos \lambda)$$

$$MS^2 = MH^2 + HS^2 = R^2 (1 - \cos^2 \beta \cdot \cos^2 \lambda) + (h + R (1 - \cos \beta \cdot \cos \lambda))^2$$

$$MS = \left( R^2 (1 - \cos^2 \beta \cdot \cos^2 \lambda) + (h + R (1 - \cos \beta \cdot \cos \lambda))^2 \right)^{1/2}$$

$$\text{Calcul : } \quad \quad \quad R = 6\,370 \text{ km} \quad \quad \quad h = 35\,760 \text{ km}$$

$$\quad \quad \quad b = 6,7^\circ \quad \quad \quad l = 48^\circ$$

$$MS = \left( 6\,370^2 \left( 1 - \cos^2 6,7^\circ \cdot \cos^2 48^\circ \right) + \left( 35\,760 + 6\,370 (1 - \cos 6,7^\circ \cdot \cos 48^\circ) \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$\mathbf{MS = 38\,194 \text{ km}}$$

### 2.2.5. Calcul de la distance Avignon - Satellite

Coordonnées :

- Avignon (A) - latitude :  $44^\circ$  Nord, longitude :  $5^\circ$  Est.

Valeurs des angles :

$$\alpha = 10^\circ \quad \lambda = 44^\circ \quad \beta = 2 \text{ Arc sin } [\cos 44^\circ \cdot \sin (10^\circ/2)] = 7,2^\circ$$

Le calcul est identique au précédent :

$$AS = \left( R^2 (1 - \cos^2 \beta \cdot \cos^2 \lambda) + (h + R (1 - \cos \beta \cdot \cos \lambda))^2 \right)^{1/2}$$

Calcul :

$$AS = \left( 6\,370^2 \left( 1 - \cos^2 7,2^\circ \cdot \cos^2 44^\circ \right) + \left( 35\,760 + 6\,370 (1 - \cos 7,2^\circ \cdot \cos 44^\circ) \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$\mathbf{AS = 37\,847 \text{ km.}}$$

### 3. VITESSE DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

#### 3.1. Différence de marche entre les deux trajets

- Distance Monte-Carlo - Valensole - Avignon :

$$d_1 = 200 \text{ km}$$

- Distance Monte-Carlo - Paris - Mulhouse - Satellite - Avignon :

$$d_2 = 1\,000 + 38\,194 + 37\,847 = 77\,041 \text{ km}$$

- Différence de marche :

$$d = d_2 - d_1$$

$$d = 77\,041 - 200 = 76\,841 \text{ km}$$

#### 3.2. Calcul de la vitesse des ondes électromagnétiques

##### *Expérience du 6 juin 1994*

Matériel :

- un ordinateur 486 SX,
- une imprimante compatible,
- une interface CANDIBUS,
- Logiciel LABO,
- Un poste radio à tuner numérique,
- un baladeur.

Réglages du logiciel : Identiques à ceux préconisés dans l'article de référence du B.U.P. n° 759.

Décalage horaire mesuré à l'ordinateur entre les deux signaux, à la réception :

Posons :  $t_d = t_2 - t_1$  soit  $t_d = 257 \text{ ms} = 0,257 \text{ s}$

Vitesse calculée :

$$v = d / t_d \quad \text{soit} \quad v = 76\,841 / 0,257 = \mathbf{298\,992 \text{ km/s}}$$

$$\mathbf{v = 299\,000 \text{ km/s}}$$

Vitesse de la lumière : 299 792,458 km/s (valeur de référence actuelle).

### 3.3. Discussion sur les incertitudes associées aux mesures et sur la validité du résultat

L'incertitude absolue sur  $t_d$ , au vu de plusieurs mesures est de l'ordre de :

$$\Delta t = 2 \text{ ms} = 2.10^{-3} \text{ s}$$

L'incertitude absolue sur la différence de marche peut être appréciée à :

$$\Delta d = 200 \text{ km}$$

Calcul de l'incertitude relative sur  $v$  :

$$\Delta v/v = \Delta d/d + \Delta t/t_d$$

$$\Delta v/v = 200/76\,841 + 2.10^{-3}/0,257 = 1.10^{-2} \quad \text{soit } 1 \%$$

Incertainitude absolue évaluée :  $\Delta v \approx 3\,000 \text{ km/s}$ .

Une analyse statistique sur plusieurs dizaines de mesures permettra d'affiner le résultat.

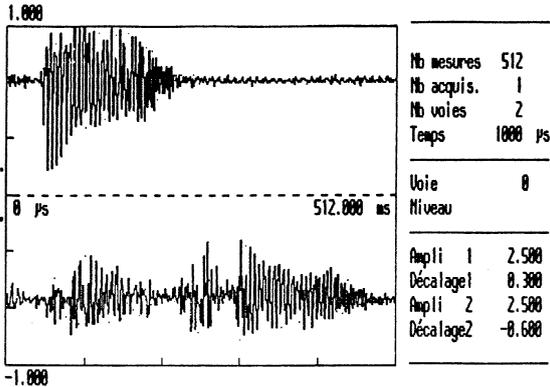
### BIBLIOGRAPHIE

- J.-C. PIVOT : «*Mesure directe de la vitesse de la lumière*» - B.U.P. n° 759.
- Télé Satellite (Le mensuel des nouvelles Télévisions).  
Ce périodique donne notamment les positions d'un grand nombre de satellites géostationnaires, les programmes de Télévision et de radio qu'ils réémettent, ainsi que leurs fréquences.
- «*Voyage au cœur de la lumière*» - Science et vie - Hors série n° 186.
- R.M.C. et Services techniques de R.M.C. (Monte-Carlo) - 41, La Canebière - 13001 MARSEILLE.

## Annexe

---

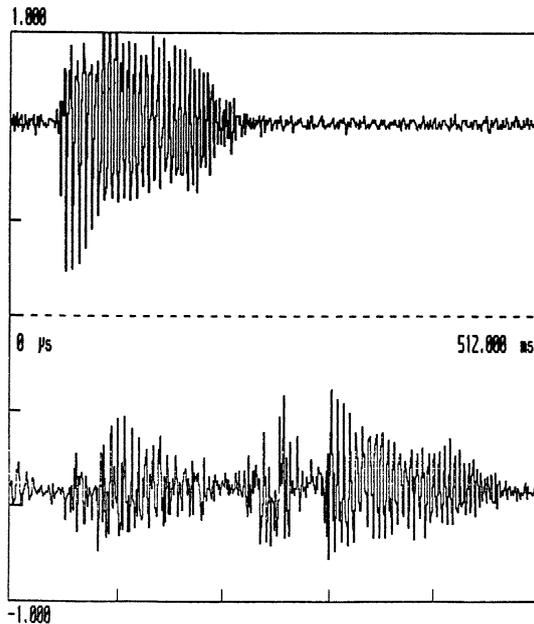
Document sur la position des satellites géostationnaires (Télé Satellite).



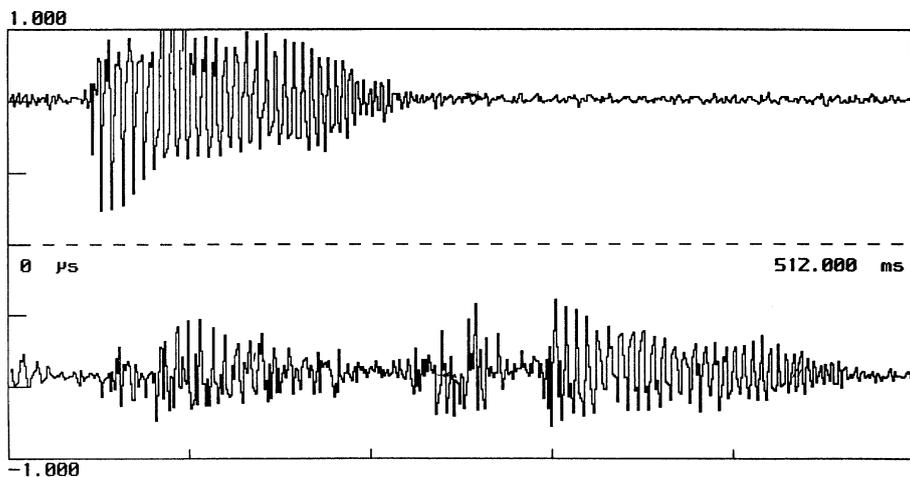
-1.000

Echelle manuelle

Courbes tracées : 1, 2



-1.000



Document original relatif à l'expérience du 6 juin 1994.

«Mesure de la vitesse des ondes électromagnétiques».

Réglages de la configuration du logiciel LABO de Langage et informatique.

• **Se placer dans le menu DESSIN**

– Sous-menu PARAMÈTRES

Choisir 2D

- Courbes tracées : 1,2
- Courbe échelle : 0 ⇒ dans la courbe échelle :
  - Minimum sur x : 0.00
  - Maximum sur x : 512 000
 (C'est la durée totale de l'acquisition, soit  $512 * 1\,000 = 512\,000 \mu\text{s}$ )
- Courbe de référence : 1
  - Minimum sur y : - 1.00
  - Maximum sur y : + 1.00

• **Se placer dans le menu PARAMÈTRES**

- Sous-menu DONNÉES
  - Nombre de mesures : 512
  - Nombre d'acquisitions : 1
  - Nombre de voies : Deux voies
  - Temps en  $\mu$ s : 1 000  
(C'est la période d'échantillonnage)
- Sous-menu VOIE
  - Ampli 1 : 2.5
  - Décalage 1 : 0.300
  - Ampli 2 : 2.5
  - Décalage 2 : - 0.600

*Utilisation des documents en Annexe*

Une mesure réussie nécessite en général plusieurs essais. Il est préférable d'attendre qu'un commentateur parle de façon à capter un signal juste après un silence.

Sur le document le signal du haut correspond à la réception en A.M. et celui du bas, en retard, à la réception en F.M.

On repère les fronts d'ondes de signaux A.M. et F.M. identiques.

Pour mesurer le décalage horaire  $t_d$  :

- utiliser l'option POINTEUR,  
dans le menu OUTILS.

Placer le pointeur des abscisses au début du front d'onde du signal F.M. correspondant à celui du signal A.M. identique. Placer ensuite le pointeur au début du front d'onde du signal A.M.

Calculer alors la différence des abscisses qui s'affichent à l'écran.