

## Expérience de Bertozzi (approche documentaire)

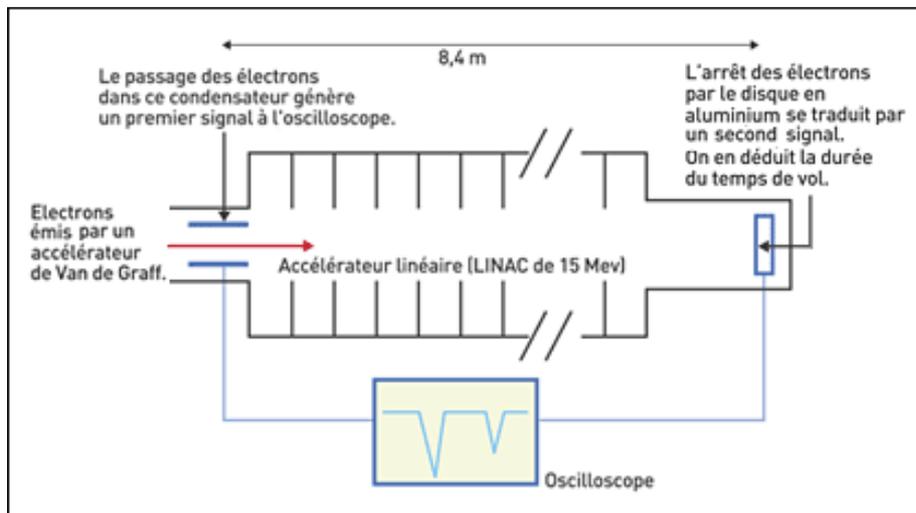
Le phénomène de dilatation du temps a été confirmé expérimentalement en 1941 en observant la désintégration des muons (particules instables). La durée de vie  $\Delta t_m$  des muons à la vitesse  $v$  (par rapport à l'observateur) est liée à sa durée de vie au repos  $\Delta t_p$  par la relation relativiste :

$$\Delta t_m = \gamma \Delta t_p \text{ avec } \gamma = 1 / [1 - (v/c)^2]^{1/2}$$

Lorsqu' Albert Einstein décrit sa théorie relativiste en 1905, il exprime cette dilatation du temps en introduisant le coefficient  $\gamma$ .

Ce coefficient n'a de sens que si la vitesse  $v$  de la particule est inférieure à la vitesse de la lumière dans le vide  $c$ . La célérité de la lumière devient alors une barrière infranchissable.

En 1964, un scientifique américain, William Bertozzi, réalise une expérience qui confirme cette hypothèse.



### Schéma de l'expérience de Bertozzi :

L'accélérateur Van de Graff accélère les électrons émis par un canon à électrons jusqu'à 1,5 MeV. Pour obtenir des énergies plus élevées, on active les premières tranches du LINAC, sur une distance d'environ 1 mètre (énergie fournie de 4,5 MeV), voire l'ensemble des tranches du LINAC (énergie fournie de 15 MeV) ce qui réduit en principe d'autant la longueur du vol libre de l'électron (sans champ électrique). Les résultats expérimentaux vont montrer néanmoins qu'entre 1,5 MeV et 15 MeV, la vitesse moyenne de l'électron dans le LINAC n'est pas sensiblement modifiée et est proche de la vitesse de la lumière.

### Document 1:

Extrait de l'article publié par W. Bertozzi dans : American Journal of Physics, Volume 32, Issue 7, pp. 551-555 (1964).

« Speed and Kinetic Energy of Relativistic Electrons » William Bertozzi

Department of Physics and Laboratory for Nuclear Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts (Received 6 January 1964)

“The experiment made use of the electron linear accelerator facility at MIT to provide electrons with kinetic energies between 0.5 and 15 MeV. The speed of the electrons was determined from a measurement of the time required for the electrons to traverse a given distance. The kinetic energy of the electrons determined from the measurement of accelerating electric fields and potentials was also directly measured by calorimetry.”

“... Measuring the time interval between these two signals gives the time required by the electron burst to traverse the 8.4 m length of the drift tube.

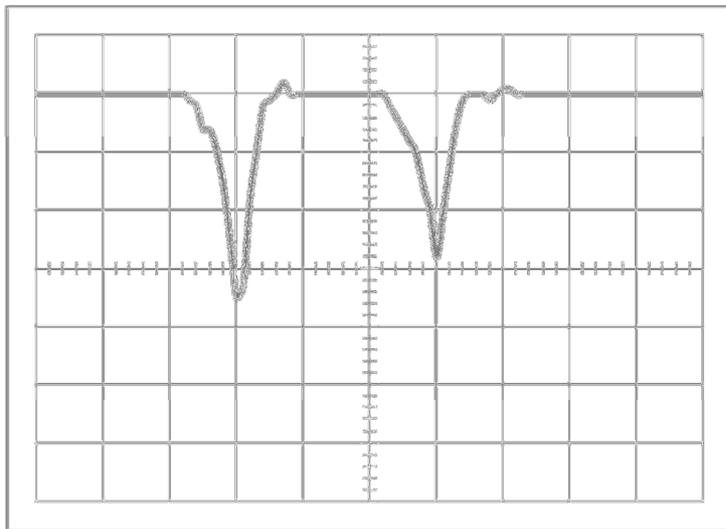
This time of flight is determined from the separation of these two signals as displayed on an oscilloscope...”

### Document 2:

Extrait de l'article publié par W. Bertozzi dans : American Journal of Physics, Volume 32, Issue 7, pp. 551-555 (1964).

A sample photograph of the face of the oscilloscope is shown for the time-of-flight measurements. Each large division (1cm) on the grid of the oscilloscope face represents  $0,98 \times 10^{-8}$ s.

The separation between the two signals on the oscilloscope represents the time of flight of the electron burst with an absolute error of less than  $7 \times 10^{-10}$  sec. ( $E = 1,5$  Mev)



### Document 3 :

Extrait de l'article publié par W. Bertozzi dans : American Journal of Physics, Volume 32, Issue 7, pp. 551-555 (1964).

$c = 3,00 \times 10^8$  m.s<sup>-1</sup>;  $t_f$  : time of flight

The data are presented in Table 1.

Table 1

E ( MeV)	$t_f \times 10^{-8}$ s	$v_{\text{exp}} \cdot 10^8$ m.s <sup>-1</sup>	$v_{\text{exp}}/c$	$(v_{\text{exp}}/c)^2$
0.5	3.23			
1.0	3.08			
1.5				
4.5	2.84			
15.0	2.80			

**Questions :**

- 1) Quel était le but de cette expérience ?
- 2) Quelle est la nature du mouvement des électrons dans la partie active du tube accélérateur ?
- 3) Quelle est la nature du mouvement des électrons après la sortie du système accélérateur ?
- 4) Préciser la formule de calcul de la vitesse des électrons à partir de la mesure de leur temps de vol, puis compléter les colonnes  $v_{\text{exp}}$  et  $v_{\text{exp}}/c$  du tableau (*par exemple dans un tableau...*).
- 5) Etablir au moyen de la mécanique classique la relation entre l'énergie fournie aux électrons et la vitesse  $v_{\text{class}}$  puis compléter la colonne  $v_{\text{class}}$  du tableau.
- 6) Tracer les courbes,  $v_{\text{exp}} = f(E)$  et  $v_{\text{class}} = f(E)$  sur le même graphe. Comparer l'évolution des deux vitesses en fonction de l'énergie fournie et montrer l'existence d'une vitesse limite pour les électrons.
- 7) Dans quelle gamme de vitesse peut-on considérer que l'expression classique de l'énergie cinétique est valable ?
- 8) En mécanique relativiste, une particule de masse  $m$  et de vitesse  $v$  possède une quantité de mouvement d'expression  $p = \gamma.mv$  avec pour coefficient  $\gamma$  :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

où  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide. Son énergie totale en mouvement est  $E_{\text{tot}} = \gamma.mc^2$  et elle possède donc une énergie au repos (quand  $v = 0$ ) égale à  $E_0 = mc^2$ . Son énergie cinétique est alors  $E_C = E_{\text{tot}} - E_0 = (\gamma - 1)mc^2$ .

Au moyen d'un développement limité de cette expression, montrer que lorsque  $v/c \ll 1$ , on retrouve l'expression de la mécanique classique de l'énergie cinétique.

- 9) On admettra qu'en mécanique relativiste, la relation entre l'énergie cinétique et la tension accélératrice est la même qu'en mécanique classique, ce qui conduit à ce que l'énergie  $E$  donnée dans le tableau correspond à l'énergie cinétique des particules.

Etablir l'expression relativiste du rapport  $v/c$  sous la forme :

$$\frac{v}{c} = A. \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + B.E)^2}}$$

Confronter les résultats expérimentaux obtenus précédemment à cette expression théorique.

- 10) A partir de 1,5 MeV, et pour atteindre les 15 MeV, les électrons sont non seulement accélérés au départ par le générateur de Van de Graaff, mais aussi continûment sur une partie de l'accélérateur linéaire ou sur sa totalité. Le protocole est-il encore valable, en particulier la détermination de la vitesse par la formule  $v = L/t$  ?

- 11) Quelle est l'ordre de grandeur de l'incertitude relative sur la vitesse  $u(v)/v$  ? Cette valeur est-elle de nature à remettre en cause les conclusions de cette expérience ?

**Données :**

masse de l'électron  $m_e = 9,1.10^{-31}$  kg ;  $c = 3,0.10^8$  m.s<sup>-1</sup> ;  
 1 eV =  $1,6.10^{-19}$  J (énergie cinétique acquise par un électron accéléré sous une d.d.p. de 1 V) ;  
 1 MeV =  $10^6$  eV ; distance entre les deux détecteurs  $L = 8,4$  m.