

Relativité d'Einstein

- Albert Einstein (1879–1955) a changé le monde en 1905 avec une seule publication dans laquelle il a décrit sa théorie de la relativité, ça fait partie de la *physique moderne*, beaucoup différente que la physique classique.
- Aujourd'hui la dernière s'appelle *la théorie de la relativité restreinte* qui s'applique quand il n'y a pas de gravitation importante.
- La relativité restreinte est une théorie simple mais subtile.
- Il y a des résultats très étonnants : e.g. une horloge en mouvement par rapport à nous apparaît de se ralentir, une règle en mouvement par rapport à nous apparaît de se contracter, ... Nous allons étudier ces phénomènes, et un peu de la théorie.

- On peut décrire la relativité restreinte comme une théorie de *la géométrie de l'espace et du temps*; en effet, il s'appelle l'espace-temps. Pour comprendre en détail vous devez attendre le L3 et suivre le cours *Cosmologie et Astrophysique*.
- En 1915 Einstein publia sa théorie de relativité générale, qui comprend la gravitation et généralise la théorie de la relativité restreinte. Dans la relativité générale l'espace et le temps sont décrits comme *courbes*, donnant la possibilité des phénomènes bizarres comme les trous noirs et l'expansion de l'univers. Les mathématiques sont beaucoup plus compliquées. Pour aborder plus vous devez attendre le L3 et suivre le cours *Cosmologie et Astrophysique*.

Renseignements pratiques

- Robert Scott, robert.scott@univ-brest.fr,
- Bureau : C303, Tél : 0298-01-6197,
- Site web : <http://stockage.univ-brest.fr/~scott/>
- Vous pouvez me demander des questions pendant le cours, ou, si vous préférez, m'envoyer un mail après pour poser la question ou d'avoir un rendez-vous.
- Supports :
 - Notes de cours de Jacques Langnois (voir cite web ci-dessus)
 - Introduction à la relativité par James Smith
 - Anglais : Introduction de special relativity by James Smith
 - Anglais : Special relativity by A.P. French

— e-penser

<https://www.youtube.com/watch?v=KX9QSjv0Ib0>

Relativité

3 La Relativité Restreinte

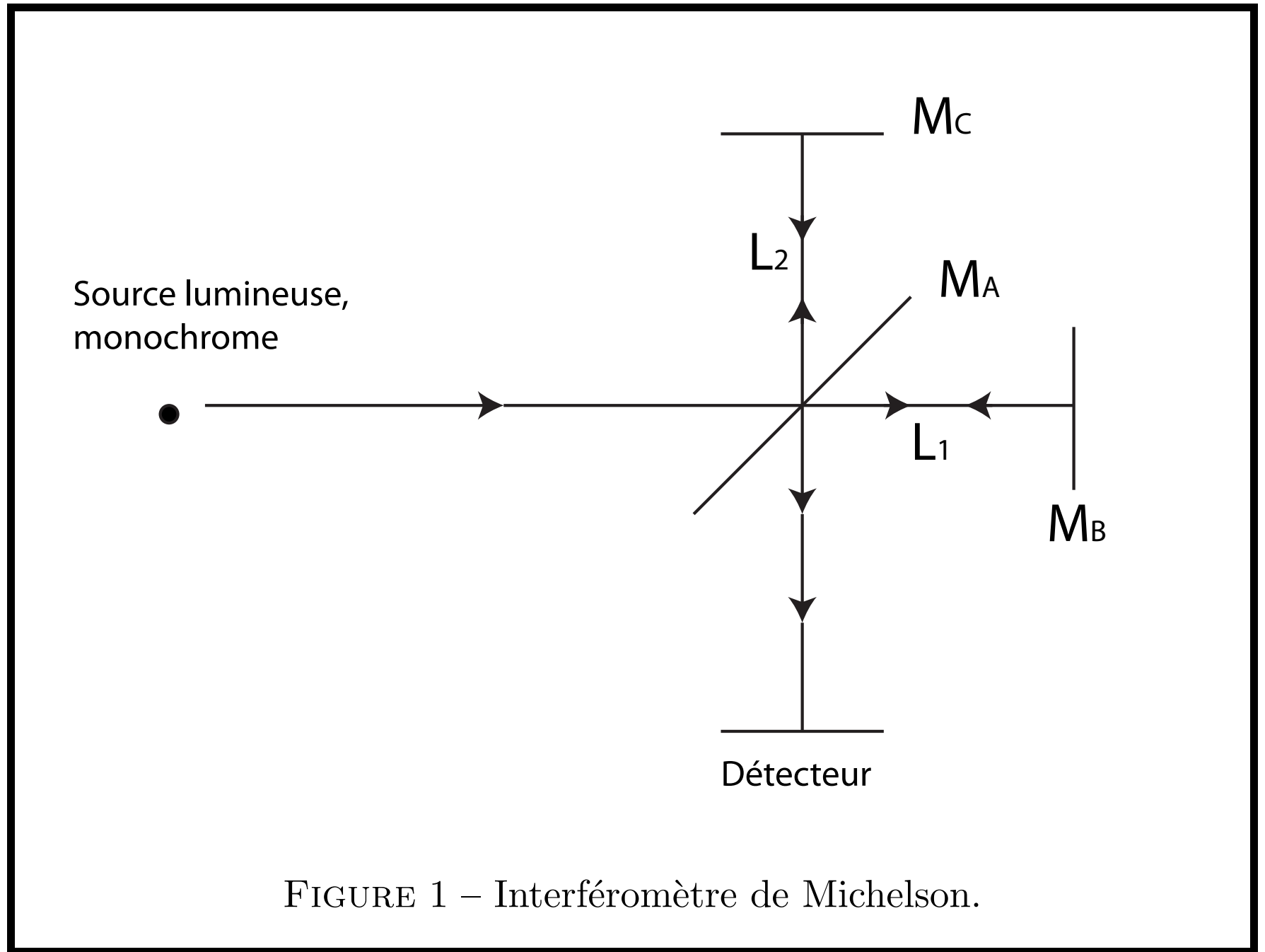
- 3.1 Postulats de la relativité restreinte,
- 3.2 Invariance des longueurs perpendiculaires au mouvement relatif,
- 3.3 La transformation de Lorentz,
- 3.4 Addition des vitesses,
- 3.5 Dilatation des durées,
- 3.6 Contraction des longueurs,
- 3.7 Transformation des vitesses

Cours 1. Michelson et Morley

- L'interféromètre de Michelson (§2.5 dans les notes de cours de Jacques Langnois).
- L'expérience de de Michelson et Morley (§2.6 et 2.7 dans les notes de cours de Jacques Langnois).

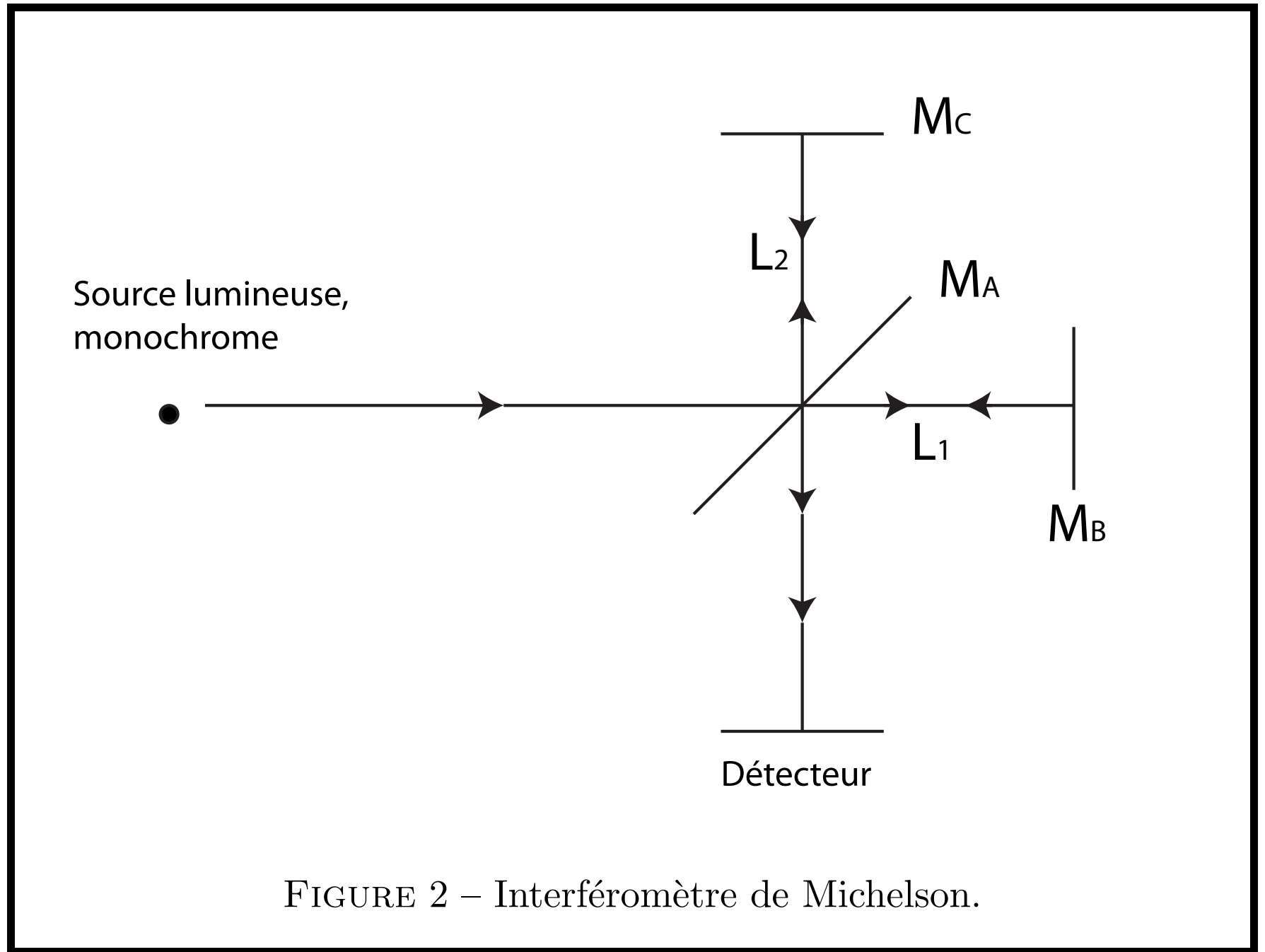
Interféromètre de Michelson

- Dans l'interféromètre de Michelson l'amplitude de l'onde est divisée par un miroir semi-transparent. L'interférence est produite en recombinaison des deux parties.
- Interférence :
<https://www.youtube.com/watch?v=LaNZ-LSpE8E>
- Une source S produit un faisceau de lumière monochromatique dirigé sur une lame M_A dont la face arrière est partiellement métallisée pour la rendre semi-transparente. Le faisceau est alors divisé en deux parties d'égale intensité. Le faisceau transmis est réfléchi par le miroir M_B tandis que le faisceau réfléchi est dirigé vers le miroir M_C .



- Le détecteur D reçoit le faisceau réfléchi par M_B puis par M_A ainsi que le faisceau réfléchi par M_C puis transmis par M_A .
- Si les deux ondes arrivent en phase au détecteur l'intensité est maximale et si elles arrivent en opposition de phase elle est minimale.
- Le parcours entre la source et M_A de même qu'entre M_A et le détecteur ne donne lieu à aucun déphasage. Le déphasage ne dépend que de la longueur des bras L_1 et L_2 de l'interféromètre. Si $L_1 = L_2$ les ondes arrivent en phase au détecteur. De même si la différence de longueur est $\lambda/2$ les ondes arrivent en phase car la différence de marche est λ pour un aller et retour. Si la différence de longueur est $\lambda/4$ les ondes arrivent en opposition de phase.
- La longueur d'onde de la lumière étant très petite il est impossible de s'assurer de la longueur des bras à une fraction

de longueur d'onde précis. L'interféromètre permet cependant de détecter un changement de conditions d'interférence. Si le miroir M_B est déplacé d'une petite distance au moyen d'une vis, l'intensité reçue par le détecteur varie périodiquement. On peut ainsi mesurer la longueur d'onde si le déplacement du miroir est connu.



L'expérience de Michelson et Morley

Motivation

- Michelson et Morley ont décidé d'utiliser l'interféromètre de Michelson pour essayer de mesurer la vitesse de la terre par rapport à l'éther.
- C'était une série d'expériences entre 1881 et 1887.
- Rappelez-vous qu'en 1865 J. C. Maxwell a découvert les équations qui prédisent les ondes électromagnétiques, qui se propagent avec la même vitesse de la lumière. Alors, c'était la preuve, pas définitive mais forte, que la lumière est une onde électromagnétique.
- Les ondes, normalement, elles ont besoin d'un milieu qui assure leur propagation. Mais c'était un milieu particulier, qui laisse passer la terre mais qui assure la propagation des ondes lumineuses très vites. Ce milieu s'appelle l'éther.

- La vitesse tangentielle de la terre par rapport au soleil est de 30 km par seconde. Aujourd'hui nous savons que le système solaire se déplace à 90 km/s par rapport à la Galaxie. Même si ces vitesses sont très inférieures à celle de la lumière ($c = 300.000$ km par seconde) l'interféromètre de Michelson avait la précision nécessaire pour mettre en évidence le mouvement de la terre par rapport à l'éther (s'il existerait).

Une analogie

- Pour illustrer l'idée de l'expérience prenons l'exemple d'un nageur qui peut se déplacer à une vitesse c par rapport à l'eau. L'eau de la rivière se déplace à la vitesse v [par rapport aux rives] et le nageur veut traverser la rivière perpendiculairement au courant pour aller de A à B .

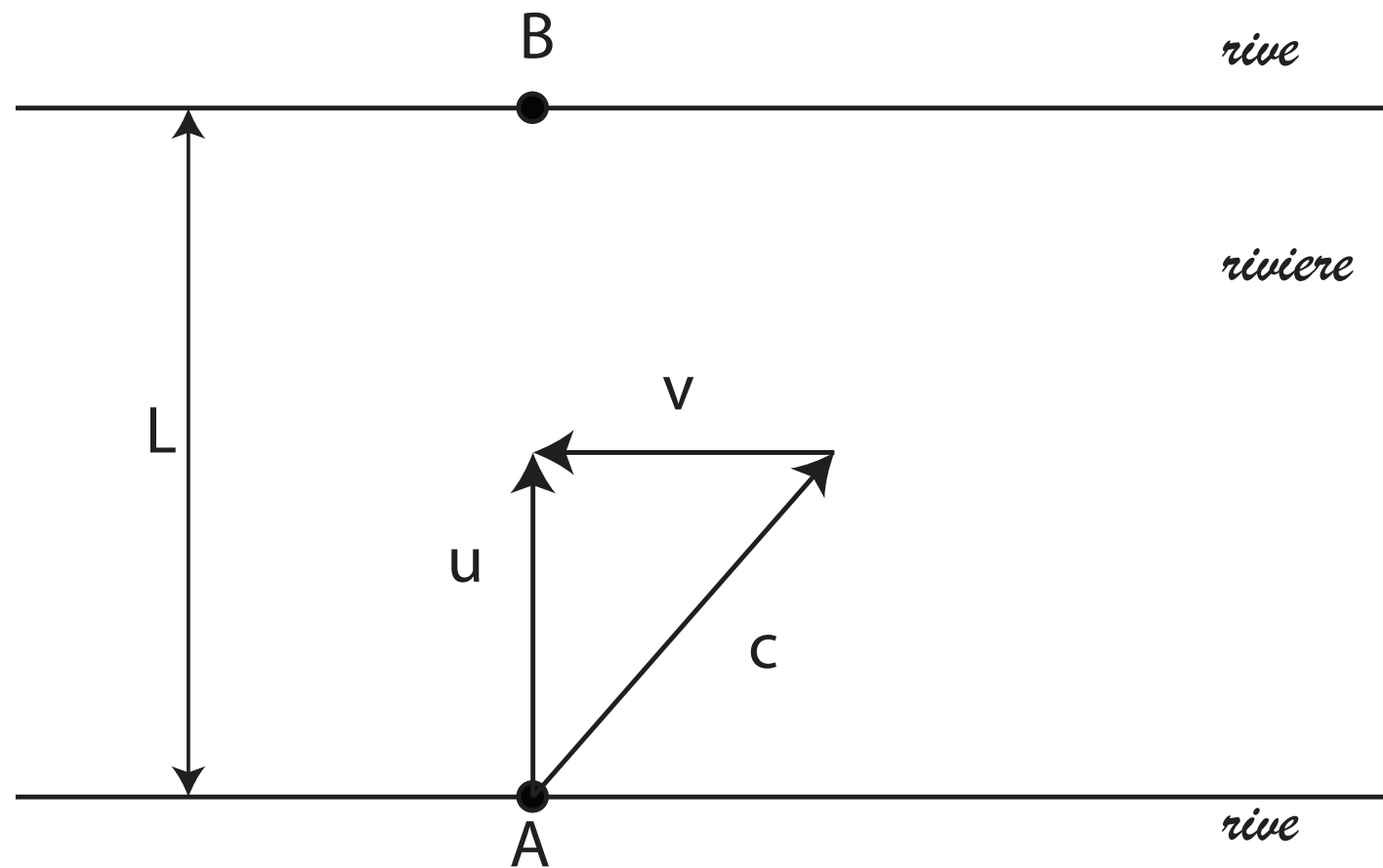


FIGURE 3 – Nager traverse la rivière de A à B .

- Il doit choisir la direction de sa vitesse de telle sorte que la résultante soit dirigée de A vers B . Autrement dit la composante de sa vitesse parallèle à la rivière doit annuler la dérive due à l'écoulement de l'eau.
- La norme de la vitesse étant imposée la composante perpendiculaire au courant est :

$$c_{\perp} \equiv u = \sqrt{c^2 - v^2}.$$

- Le temps nécessaire pour un aller retour est donc :

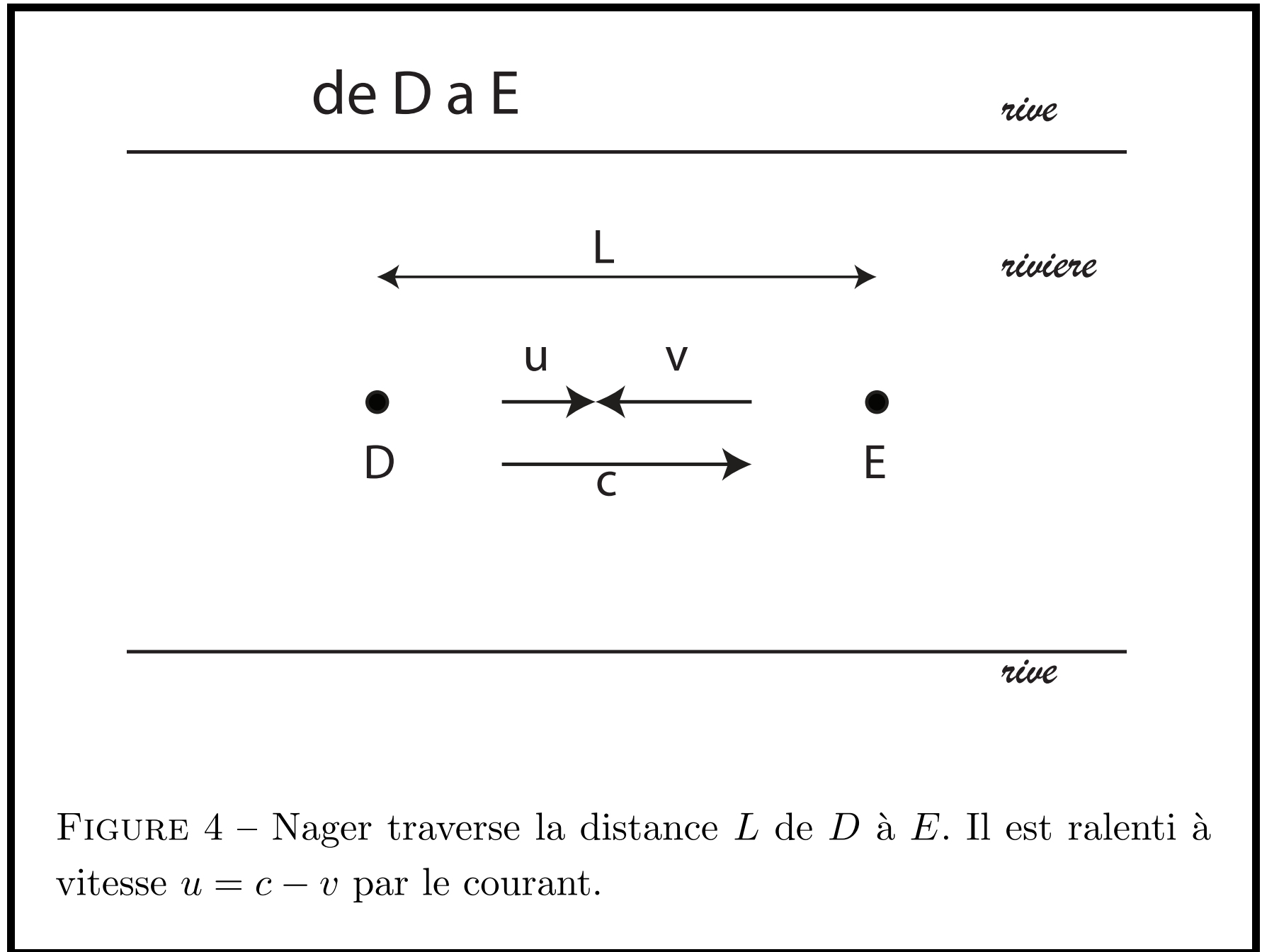
$$t_{\perp} = 2 \frac{L}{c_{\perp}} = 2 \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = 2 \frac{L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

où L est la largeur de la rivière.

- Calculons maintenant le temps nécessaire pour faire un aller et retour entre les deux points D et E séparés d'une distance L sur une même ligne de courant. Pour aller de D à E (à

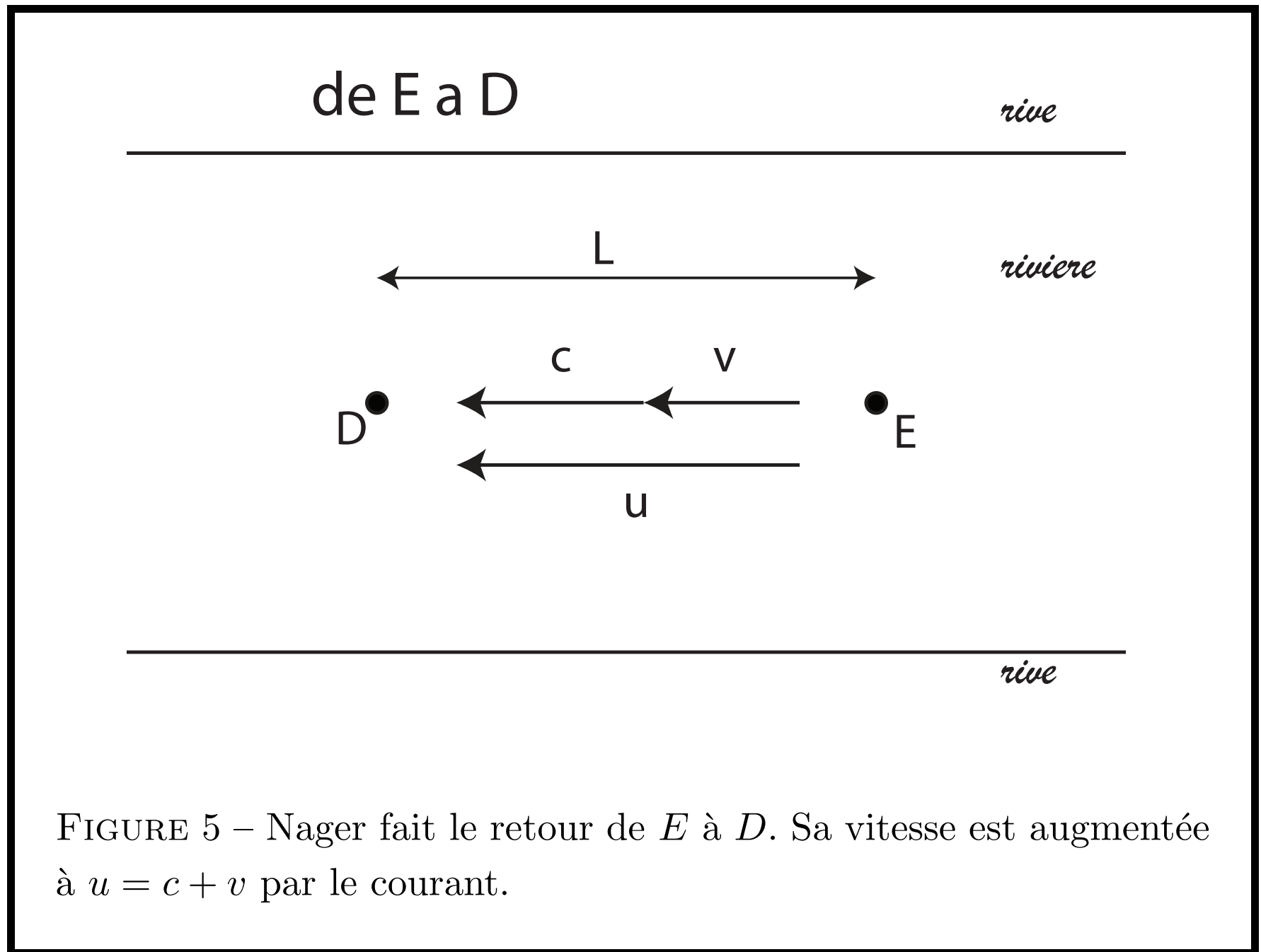
contre courant) la vitesse du nageur par rapport à la rive $c - v$, et le temps nécessaire est :

$$t_{\text{aller}} = \frac{L}{c - v}.$$



— Pour le retour la vitesse du nageur est (par rapport à la rive) est $(c + v)$ et donc le temps nécessaire est :

$$t_{\text{retour}} = \frac{L}{c + v}.$$



— Le temps pour l'aller-retour est donc :

$$\begin{aligned} t_{\parallel} &= t_{\text{aller}} + t_{\text{retour}} = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = L \left(\frac{1}{c-v} + \frac{1}{c+v} \right) \\ &= L \frac{2c}{c^2 - v^2} = 2 \frac{L}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

— Le temps pour franchir une même distance est donc différent selon que le trajet est perpendiculaire ou parallèle à la rivière.

L'expérience de Michelson et Morley

- Supposons que le bras AB de l'interféromètre de longueur L_1 soit dans la direction du déplacement de la terre par rapport à l'éther et que le bras AD de longueur L_2 soit perpendiculaire à cette direction, Fig. 6.

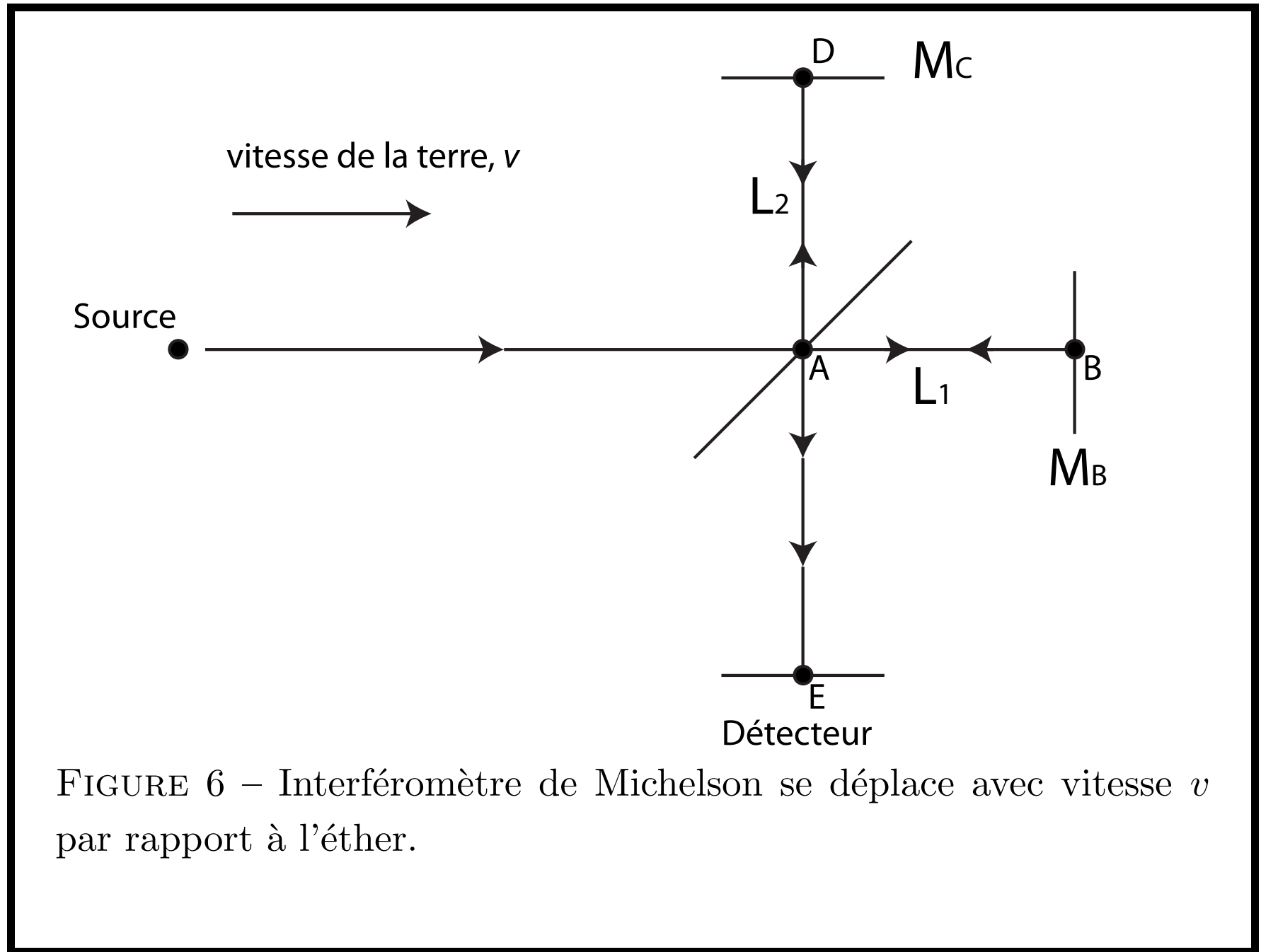


FIGURE 6 – Interféromètre de Michelson se déplace avec vitesse v par rapport à l'éther.

- Faisant l'analogie :
 - L'éther est comme l'eau de la rivière,
 - la lumière est comme le nageur,
 - la terre est comme les rives.
- La vitesse de la lumière par rapport à l'éther étant c , elle est $c - v$ par rapport à la terre (et donc à l'appareil) en allant de A à B et $c + v$ en allant de B à A . Le temps nécessaire pour l'aller-retour est donc :

$$t_1 = 2 \frac{L_1}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

- Le miroir D se déplace par rapport à l'éther. Pour que la lumière reflétée en A l'atteigne il faut qu'une composante de sa vitesse soit parallèle au mouvement de la terre et égale à v . La vitesse dans la direction perpendiculaire est donc

$\sqrt{c^2 - v^2}$ et le temps d'un aller-retour est :

$$t_2 = 2 \frac{L_2}{\sqrt{c^2 - v^2}} = 2 \frac{L_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Il existe donc une différence de temps de parcours entre les deux trajets qui est équivalente à une différence de marche.
- Le détecteur reçoit une superposition de deux ondes déphasées. On a :

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2}{c} \left(\frac{L_1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{L_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)$$

Il est difficile de distinguer ce qui provient de la longueur des bras (pas rigoureusement égales) et de la vitesse de la terre.

- En tournant l'appareil de 90° les bras AB et AD deviennent respectivement perpendiculaire et parallèle au mouvement

de la terre. On a donc :

$$t'_1 = 2 \frac{L_1}{c} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)$$

et

$$t'_2 = 2 \frac{L_2}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

— La différence de temps de parcours devient donc :

$$\Delta t' = t'_1 - t'_2 = \frac{2}{c} \left(\frac{L_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{L_2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

— La modification des conditions d'interférence en tournant

l'appareil se traduit par la différence :

$$\Delta t' - \Delta t = \frac{2}{c} \left(\frac{L_1 + L_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{L_1 + L_2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

Ce résultat ne dépend que de la somme des longueurs des bras. Il n'est donc pas nécessaire que les deux bras aient rigoureusement la même longueur.

- Lorsque la vitesse est beaucoup plus petite que celle de la lumière on a [grâce à la série du binôme] :

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$$

et

$$\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1 + \frac{v^2}{c^2}$$

- En portant ces résultats dans l'expression précédente il

vient :

$$\Delta t' - \Delta t = \frac{2}{c}(L_1 + L_2) \left(-\frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right) = -\frac{(L_1 + L_2)}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^2$$

La différence entre les décalages est donc du second ordre en (v/c) .

L'expérience de Michelson et Morley : Résultats

- La différence de marche équivalente est :

$$c(\Delta t' - \Delta t) = -(L_1 + L_2) \left(\frac{v}{c}\right)^2$$

- Dans l'appareil utilisé la longueur de chaque bras était d'environ 11 m. Pour une vitesse de 30 km/s on a $v^2/c^2 = 10^{-8}$, et la différence de marche produite par le mouvement de la terre devait être de l'ordre de $2,2 \times 10^{-7}$ m ce qui est un peu inférieure à une longueur d'onde. Le déphasage était donc facilement détectable.
- La direction du mouvement de la terre à travers l'éther n'est pas connue à priori. Michelson et Morley ont posé leur appareil sur un bain de mercure pour le stabiliser et le

tourner facilement.

- En tournant l'appareil dans toutes les directions et en répétant les mesures tout au long de l'année ils auraient certainement trouvé des conditions correspondant aux calculs précédents. La sensibilité de l'appareil permettait de détecter une vitesse de 10 km/s.
- *Or aucun effet dû au mouvement de la terre n'a pu être mis en évidence !*

L'expérience de Michelson et Morley : Interprétation

- Différentes interprétations ont été proposées dont un entraînement de l'éther avec le mouvement de la terre. Cette hypothèse était cependant incompatible avec d'autres phénomènes comme l'aberration des étoiles.
- Fitzgerald a émis l'hypothèse que les dimensions des objets dans la direction du mouvement par rapport à l'éther sont contractées d'un facteur $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. La différence de temps de parcours dans les deux bras de l'appareil s'annule ce qui rend indétectable le mouvement de la terre par rapport à l'éther. Lorentz a justifié cette contraction sur la base de la théorie électromagnétique de Maxwell.
- Einstein a proposé autre interprétation que nous allons

examiner au prochain chapitre.

Références