

Relativité d'Einstein

- Albert Einstein (1879–1955) a changé le monde en 1905 avec une publication dans laquelle il a présenté sa théorie de la relativité. Celle-ci fait partie de la *physique moderne*, très différente de la physique classique.
- Aujourd'hui, cette théorie est appelée *la théorie de la relativité restreinte*. Elle s'applique lorsqu'il n'y a pas d'effet gravitationnel important.
- La relativité restreinte est une théorie simple dans ses principes, mais subtile dans ses conséquences.
- Elle conduit à des résultats très étonnants : par exemple, une horloge en mouvement par rapport à nous semble ralentir, et une règle en mouvement par rapport à nous semble se contracter, ... Nous allons étudier ces phénomènes ainsi qu'une partie de la théorie. Nous n'avons que 6 heures de CM pour couvrir tout cela.
- On peut aussi décrire la relativité restreinte comme une théorie de *la géométrie de l'espace et du temps*; en effet, ces deux notions sont réunies dans le concept

d'espace-temps. Pour en comprendre les détails, vous pourrez attendre la L3 et suivre le cours *Cosmologie et Astrophysique*.

- En 1915, Einstein publia sa théorie de la *relativité générale*, qui inclut la gravitation et généralise la relativité restreinte. Dans cette théorie, l'espace et le temps sont décrits comme *courbes*, ce qui permet des phénomènes surprenants comme les trous noirs et l'expansion de l'Univers. Les mathématiques y sont beaucoup plus compliquées. Pour aller plus loin, vous devrez attendre la L3 et suivre le cours *Cosmologie et Astrophysique*.

Renseignements pratiques : contacts et supports

- Robert Scott, robert.scott@univ-brest.fr
- Bureau : C303
- Vous pouvez me poser des questions pendant le cours ou, si vous le préférez, m'envoyer un mail après le cours.
- Supports : <https://robertbrucescott.github.io/Research/#teaching>
 - Notes de cours de Professeur (émérite) Jacques Langlois
 - Ces diaporamas
 - TDs et, finalement, les corrigés
 - Introduction à la relativité — James Smith
 - (Anglais) *Introduction to Special Relativity* — James Smith
 - (Anglais) *Special Relativity* — A. P. French
 - Vidéo e-penser : <https://www.youtube.com/watch?v=KX9QSjv0Ib0>

Renseignements pratiques : déroulement du cours et évaluations

- 3 CM de 2 heures chacun avec 1 heure pour le CC.
- 3 TD de 2 heures chacun.
- 1 CC, QCM qui sont qualitatives. (Suivez les CM, la logique des TDs. Lisez ces diapormas.)
- L'examen finale, documents interdits. (Il faut faire des calculs similaires de TDs.)

Relativité

3. La relativité restreinte : résumé des sujets abordés dans les semaines à venir

1. La base expérimentale de la relativité restreinte
2. Les postulats de la relativité restreinte
3. Invariance des longueurs perpendiculaires au mouvement relatif
4. La transformation de Lorentz
5. Addition des vitesses
6. Dilatation des durées
7. Contraction des longueurs
8. Transformation des vitesses
9. Équivalence de la masse et de l'énergie

Cours 1 : Michelson et Morley

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

L'idée du vent d'éther

- Au XIX^e siècle, on pensait que la lumière était une onde qui se propage dans un milieu appelé **éter luminifère**, analogue à l'air pour les ondes sonores.
- Dans cette vision, l'éther définit un **référentiel absolu** dans lequel la lumière se propage à la vitesse c .
- Or la Terre se déplace dans l'espace autour du Soleil avec une vitesse d'environ

$$v \approx 30 \text{ km/s.}$$

- Si l'éther existe, la Terre devrait donc ressentir un **vent d'éther**, comme un vent apparent lorsque l'on se déplace dans l'air.
- Conséquence attendue :
 - la vitesse de la lumière mesurée **dans la direction du mouvement de la Terre** devrait être différente,
 - de celle mesurée **dans la direction perpendiculaire**.
- **Idée de Michelson et Morley :**

- comparer le temps de propagation de la lumière dans deux directions perpendiculaires,
- à l'aide d'un interféromètre très précis.

Interféromètre de Michelson

- L'interféromètre de Michelson a été conçu pour mettre en évidence une différence de la vitesse de la lumière, s'il y en avait une, lorsque la lumière se propage soit parallèlement soit perpendiculairement au mouvement relatif entre la source et le détecteur.
- 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 faisceaux.

Rappel sur le phénomène d'interférence : expérience de deux faisceaux créés par deux fentes

- Interférence : <https://youtu.be/LaNZ-LSpE8E?si=Ak2sREd8TiSA6u5V&t=80>
- 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 .

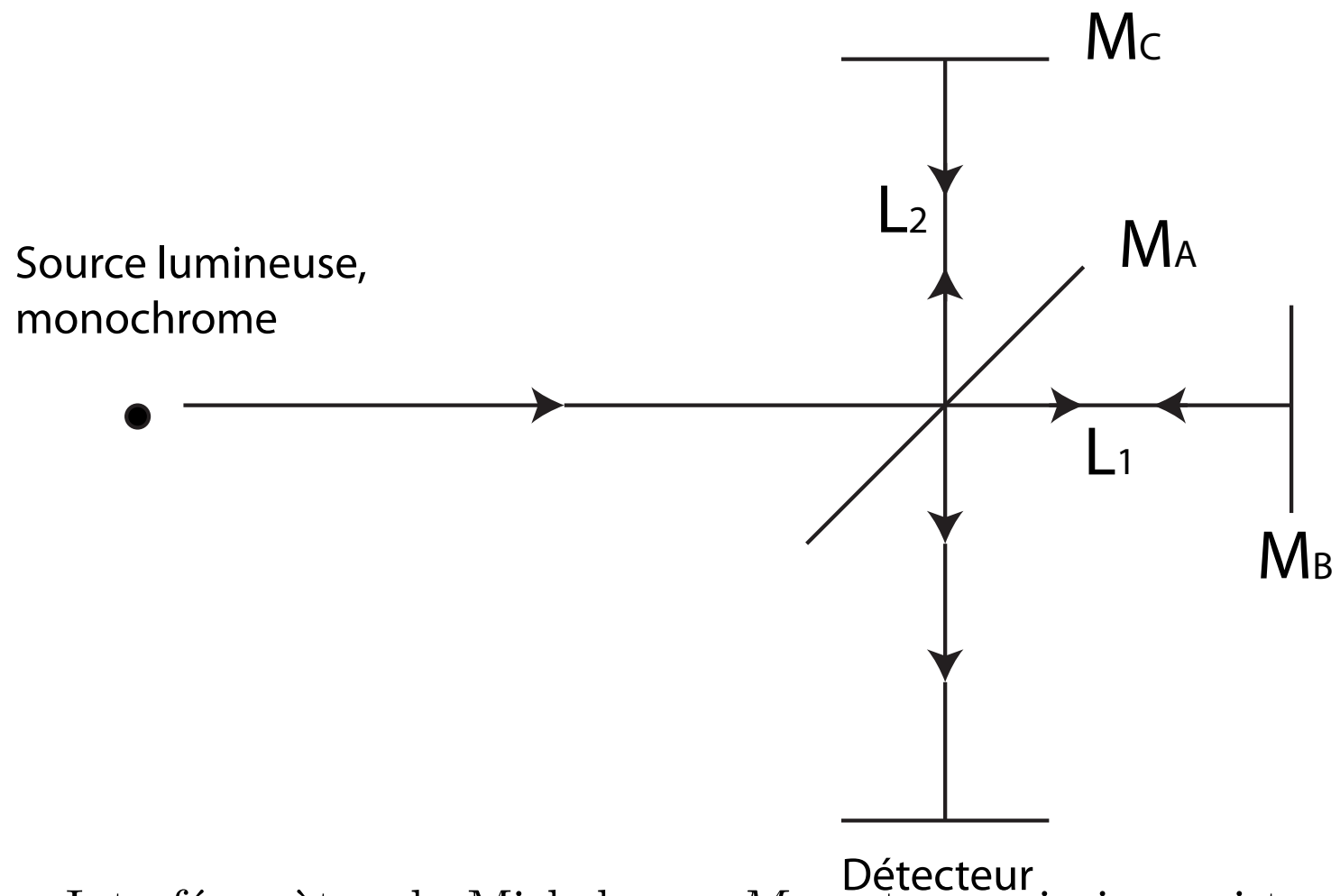


FIGURE 1 – Interféromètre de Michelson : M_A est un miroir semi-transparent. M_B et M_C sont des miroirs parfaits.

- 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 .
- Grâce aux deux trajets différents suivis par les deux faisceaux qui arrivent au détecteur, il peut y avoir une différence de marche et donc une différence de phase des deux ondes au détecteur.
- Si les deux ondes arrivent en phase au détecteur, l'intensité est maximale (interférence constructive) ; si elles arrivent en opposition de phase, elle est minimale (interférence destructive).
- Le parcours entre la source et M_A , de même qu'entre M_A et le détecteur, ne donne lieu à aucun déphasage. La différence de marche, et donc 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-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 avec une précision de l'ordre d'une fraction de longueur

d'onde. L'interféromètre permet cependant de détecter un changement des 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.

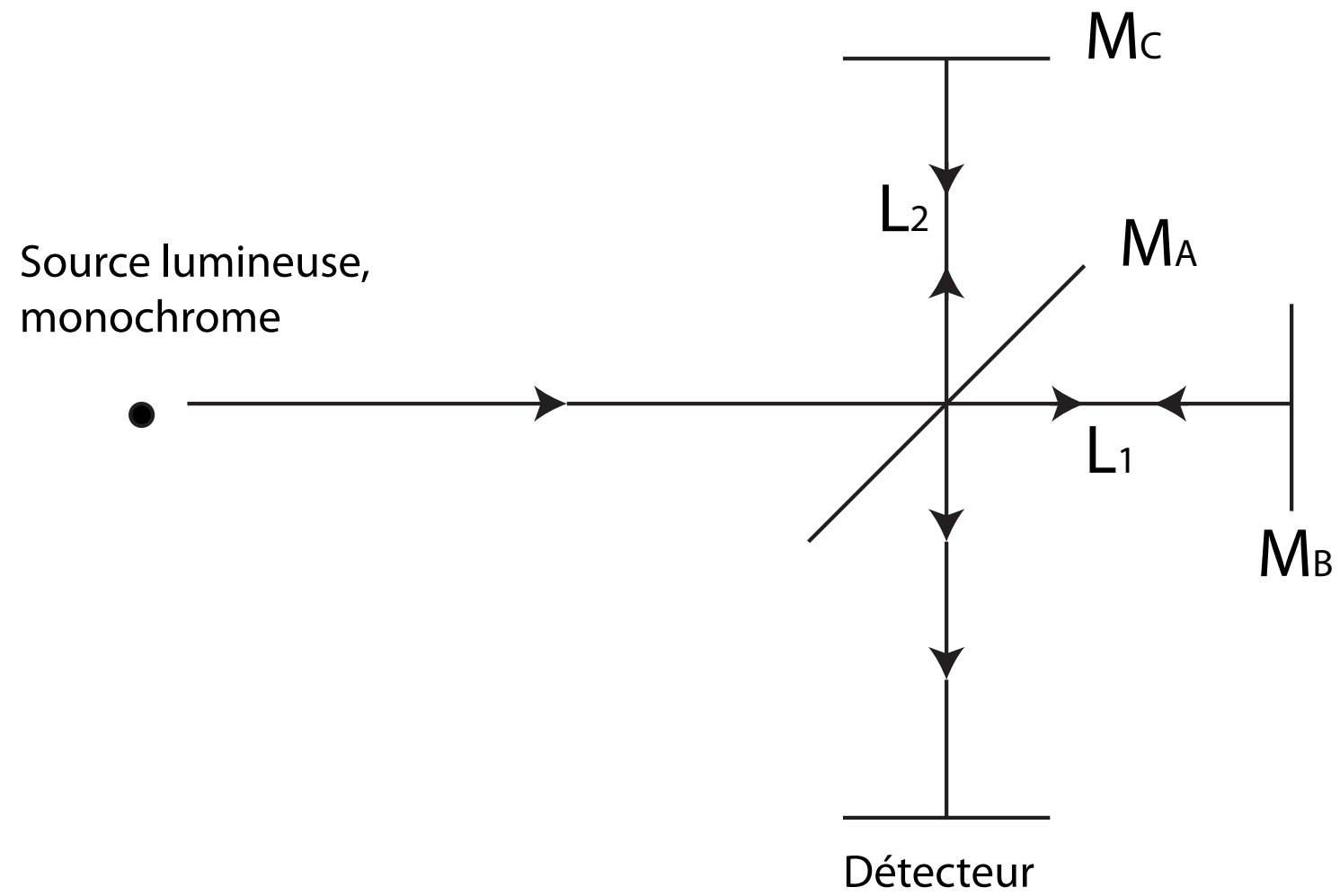


FIGURE 2 – Interféromètre de Michelson.

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.
- Il s'agissait d'une série d'expériences réalisées entre 1881 et 1887.
- Rappelez-vous qu'en 1865 J. C. Maxwell a établi les équations qui prédisent l'existence d'ondes électromagnétiques, se propageant à la même vitesse que la lumière. C'était donc une preuve, pas définitive mais très forte, que la lumière est une onde électromagnétique.
- Les ondes ont normalement besoin d'un milieu pour se propager. On supposait donc l'existence d'un milieu particulier, qui laisserait passer la Terre tout en permettant la propagation des ondes lumineuses très rapidement. Ce milieu hypothétique était appelé l'éther.
- La vitesse tangentielle de la Terre autour du Soleil est d'environ 30 km/s. Aujourd'hui, nous savons que le système solaire se déplace à environ 90 km/s par rapport à la Galaxie. Même si ces vitesses sont très inférieures à celle de la

lumière ($c = 300\,000$ km/s), l'interféromètre de Michelson avait la précision nécessaire pour mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther (s'il existait).

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 .

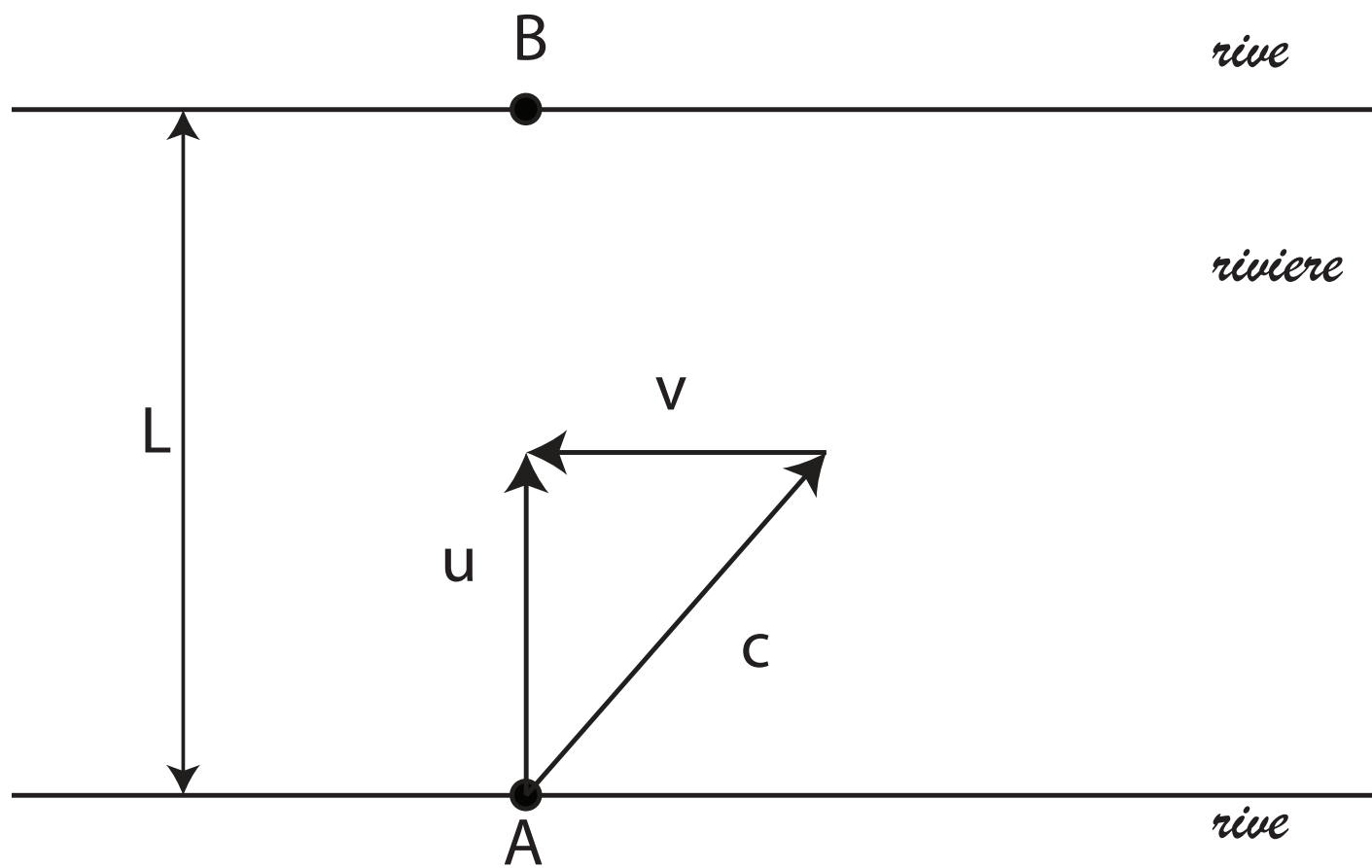


FIGURE 3 – Nager à travers la rivière de A à B .

— 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 :

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

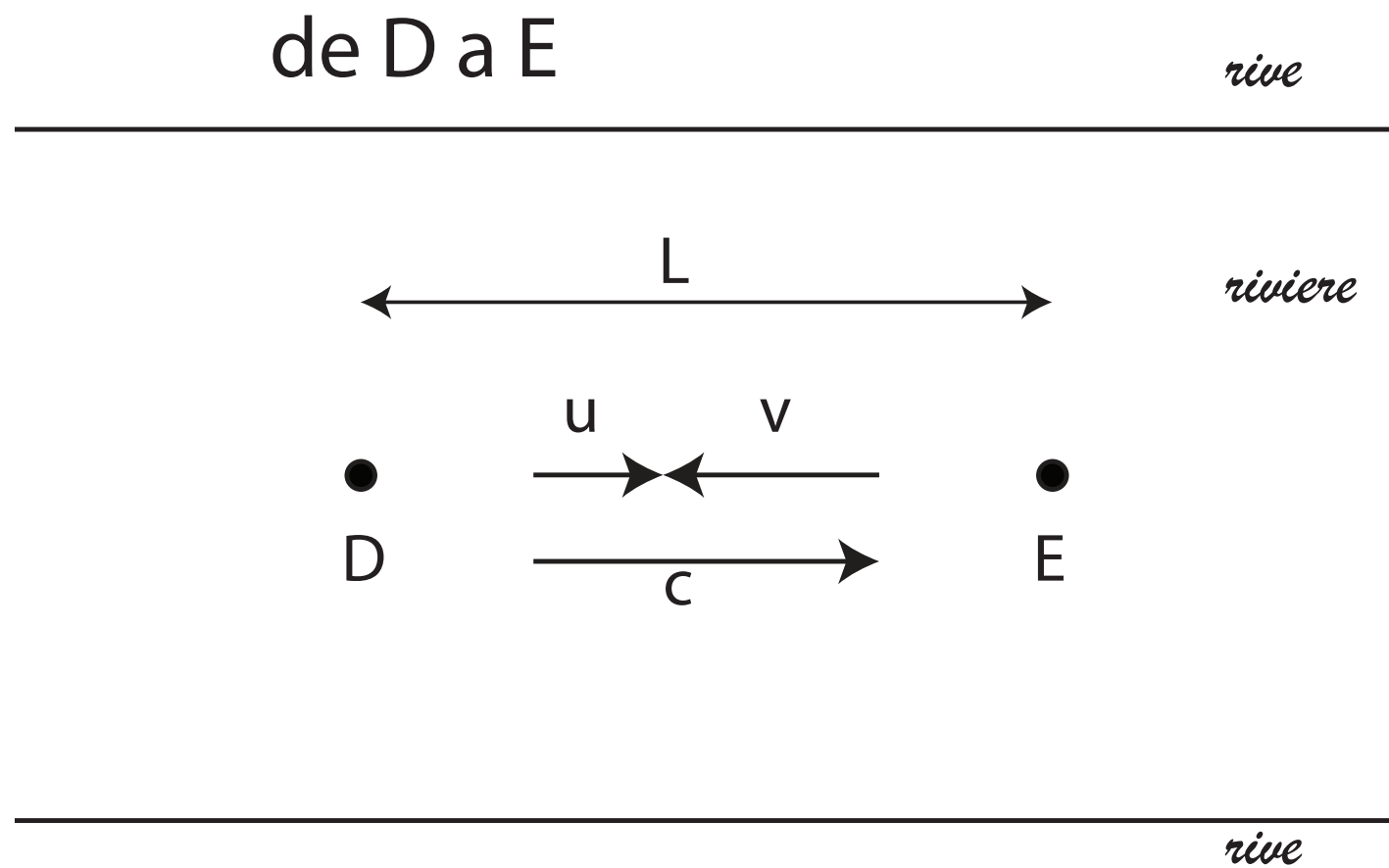


FIGURE 4 – Nager la distance L de D à E (contre le courant). Il est ralenti à vitesse $u = c - v$ par le courant.

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

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

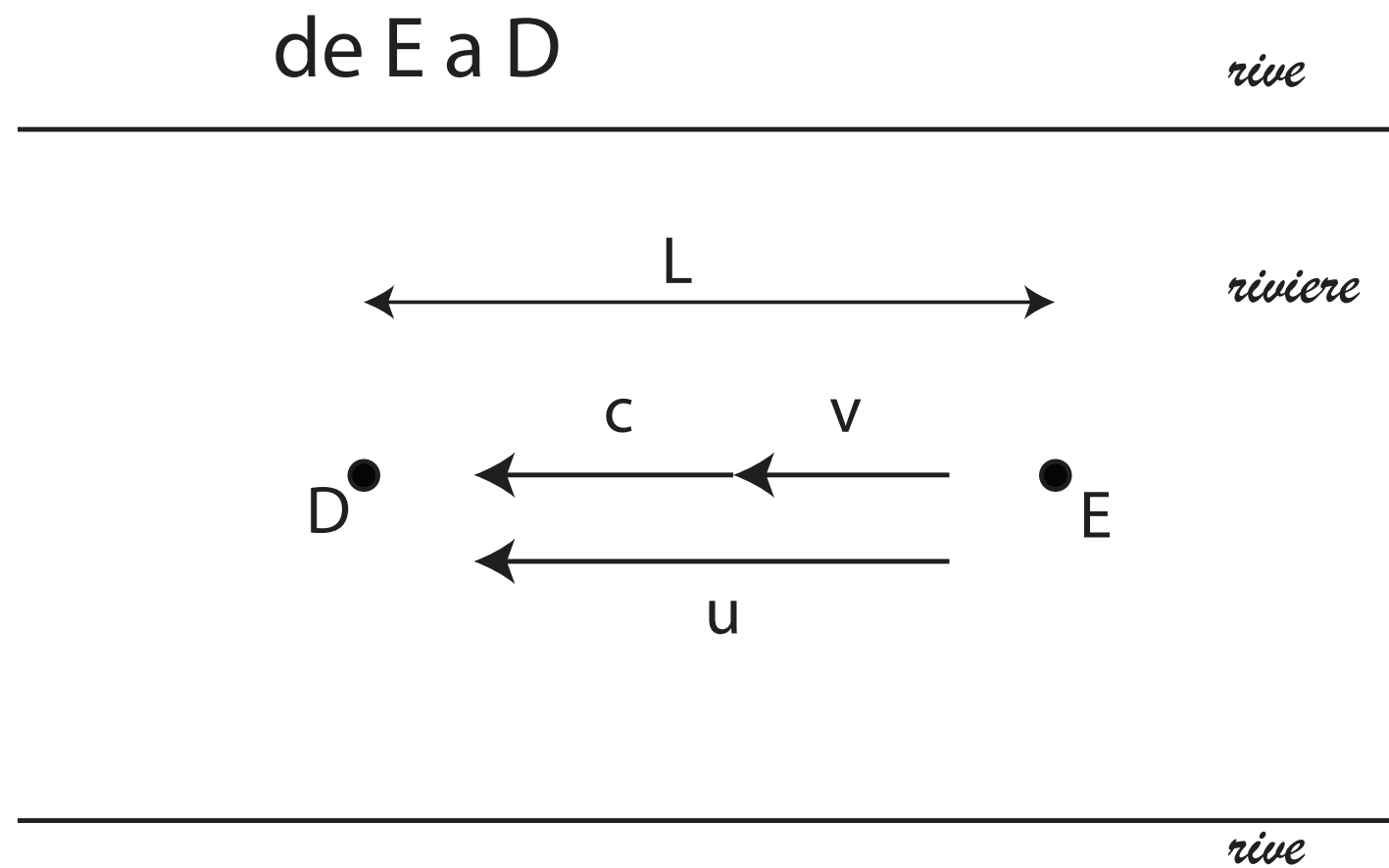


FIGURE 5 – Nageur fait le retour de E à D (avec le courant). Sa vitesse est augmentée à $u = c + v$ par le courant.

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

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

— 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.

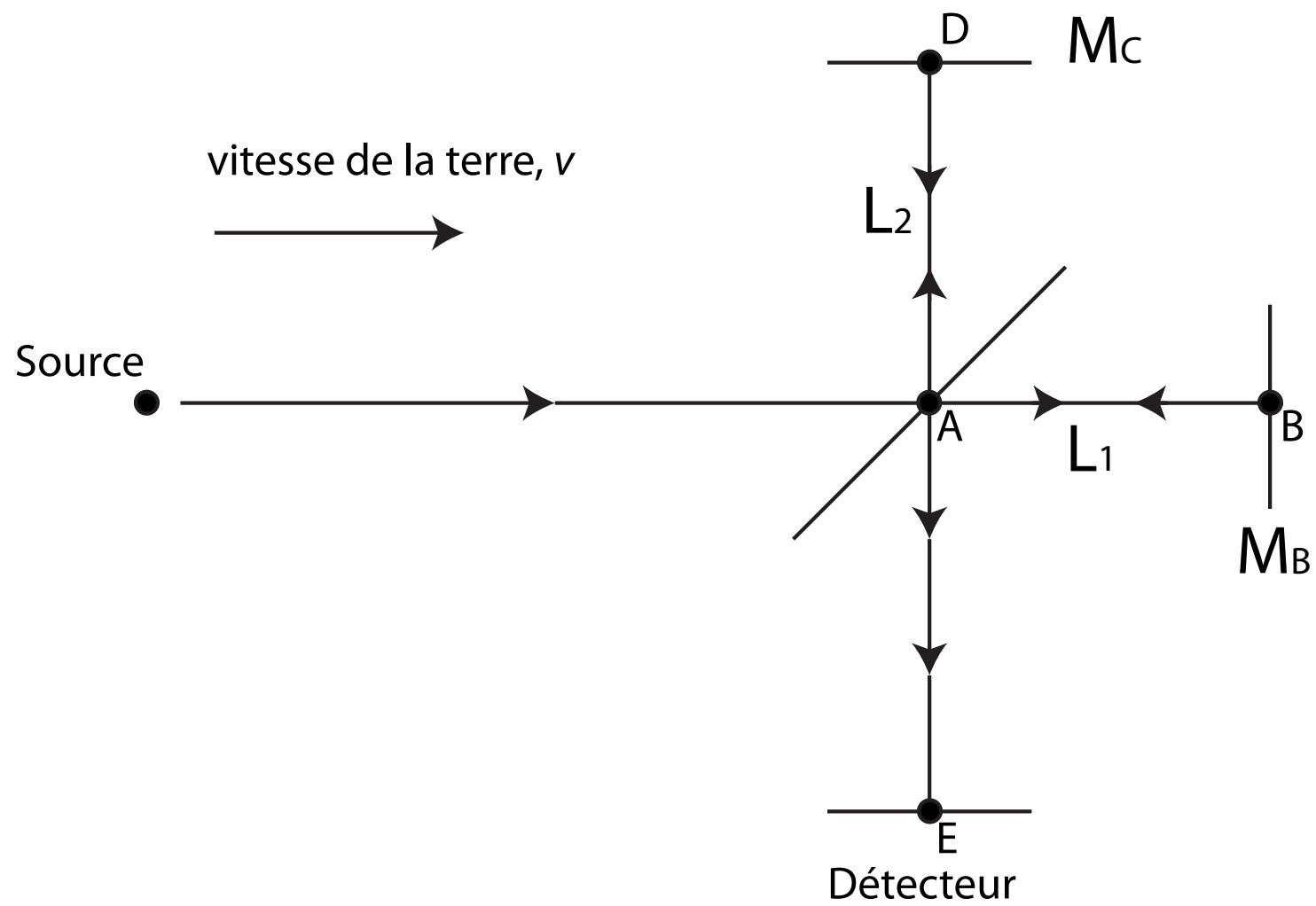


FIGURE 6 – Interféromètre de Michelson se déplace avec vitesse v par rapport à l'éther.

— Faisant l'analogie :

- L'éther est comme l'eau de la rivière,
- la lumière est comme le nageur,
- la terre, et le laboratoire fixé par terre, est comme les rives.

Analyse avec la physique de Galilée

- La vitesse de la lumière par rapport à l'éther étant c , elle serait $c - v$ 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 . (En fait, dans la physique d'Einstein, on va voir, il n'est plus vrai!) Le temps nécessaire pour l'aller-retour serait 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 serait :

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

Cours 1: l'expérience de Michelson et Morley

- Il existerait donc une différence de temps de parcours entre les deux trajets qui soit 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] :

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$$

et

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

— En portant ces résultats dans l'expression précédente ils donnent :

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

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 (800 nm = 8×10^{-7} m). 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 entrainement 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.