L'expérience de Michelson - Morley

cinématique relativiste

D'après [Youtube (Unisciel) / La physique animée : l'expérience de Michelson - Morley]

Si la lumière est une onde (expérience des trous d'Young), il est naturel de chercher un milieu matériel (nommé l'ether à l'époque où se propagerait la lumière

ON ESSAYE DE RETROUVER LE CHEMINEMENT DE PENSÉE D'EINSTEIN POUR ÉTABLIR LA FORMULE DE RELATIVITÉ RESTREINTE $E = m_R c^2$

- Dans le Référentiel Terrestre (≡ repère de Fresnel) :

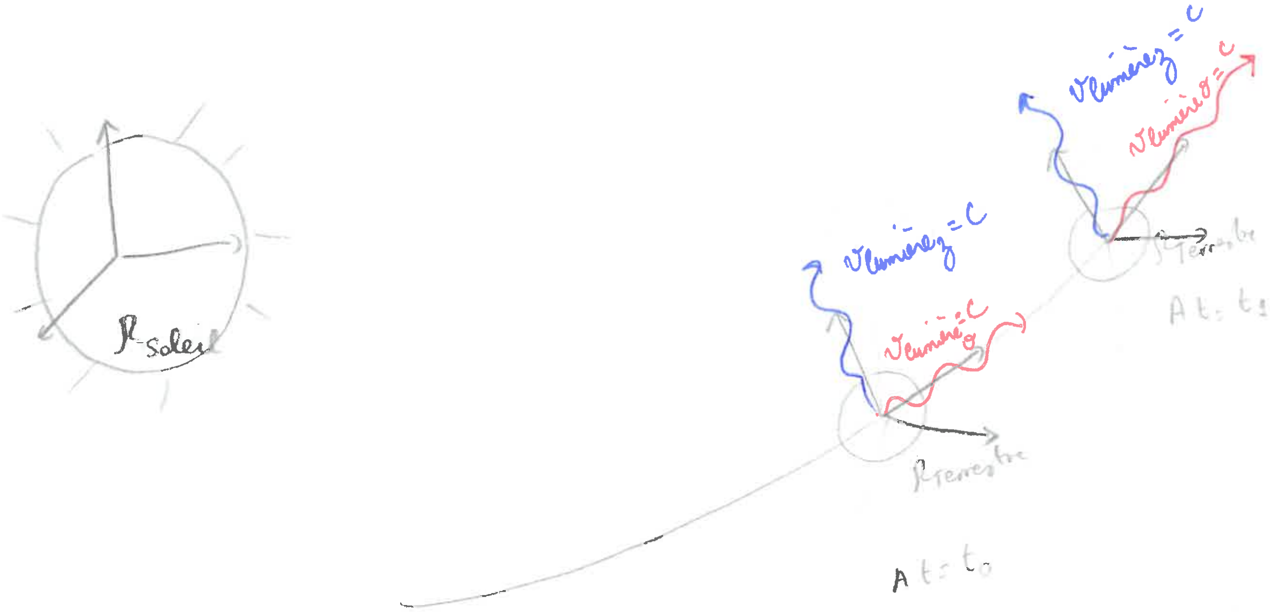
$$\vec{ST} = \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \frac{d\vec{ST}}{dt} = \dot{r}\vec{e_r} + r\dot{\theta}\,\vec{e_\theta}$$

$$\vec{ST} = \vec{RR'}$$

$$\frac{d^2\vec{ST}}{dt^2} = \ddot{r}\vec{e_r} + \dot{r}\dot{\theta}\vec{e_\theta} + \dot{r}\dot{\theta}\vec{e_\theta} + r\ddot{\theta}\vec{e_\theta} - r\dot{\theta}^2\vec{e_r}$$

$$= \ddot{r}\vec{e_r} - r\dot{\theta}^2\vec{e_r} + 2\dot{r}\dot{\theta}\vec{e_\theta} + r\ddot{\theta}\vec{e_\theta}$$

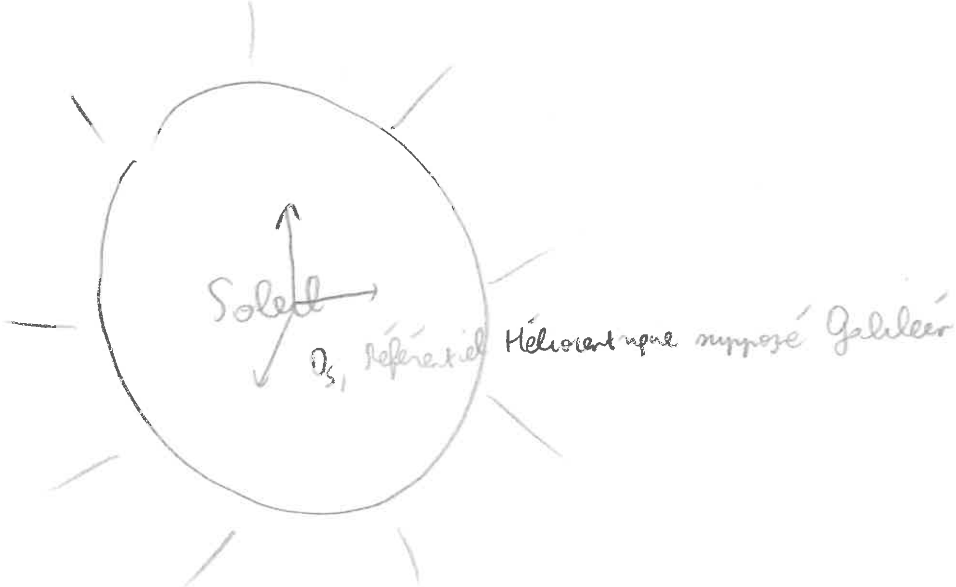
Attraction gravitationnelle

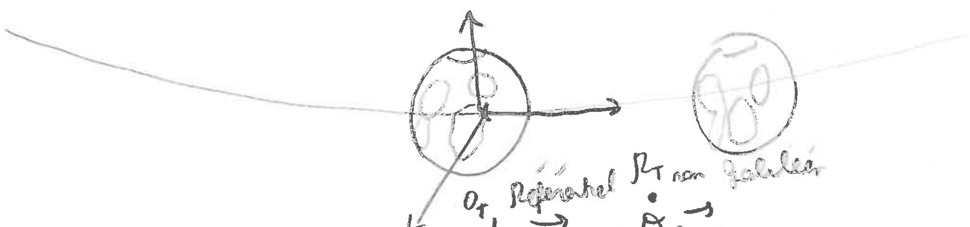


Effet des forces fictives qui viennent "diminuer" la composante de la vitesse de la lumière sur $\vec{e_\theta}$ ou "augmenter" la composante de la vitesse de la lumière sur $\vec{e_z}$ (ou $\vec{e_r}$ car r supposé invariant)

C'est justement les composantes de la vitesse sur $\vec{e_\theta}$ ($r\dot{\theta}\,\vec{e_\theta}$) qui devraient apparaître sur l'un des bras de l'interféromètre de Michelson par rapport à l'autre bras !!!

Dans l'exemple pris, $r\dot{\theta}\,\vec{e_\theta}$ ($= \vec{u}$) est supposée rectiligne sur la très courte distance parcourue par la rotation de la Terre par rapport à la distance parcourue par la Terre durant 1 cycle



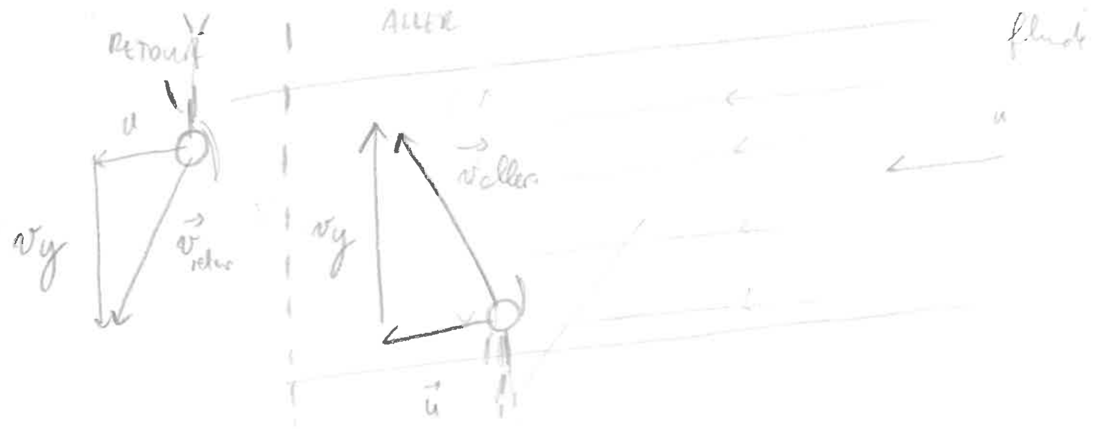


$$\vec{u} = r\dot{\theta}\vec{e_\theta}$$

2) LOI D'ADDITIVITÉ DES VITESSES :

EXPÉRIENCE PRÉLIMINAIRE : NAGEUR DANS UNE RIVIÈRE AVEC COURANT POUR MODÉLISER LA LOI D'ADDITIVITÉ DES VITESSES

Système = { particule de masse m (nageur) } de vitesse v_y dans le référentiel Terrestre supposé Galiléen

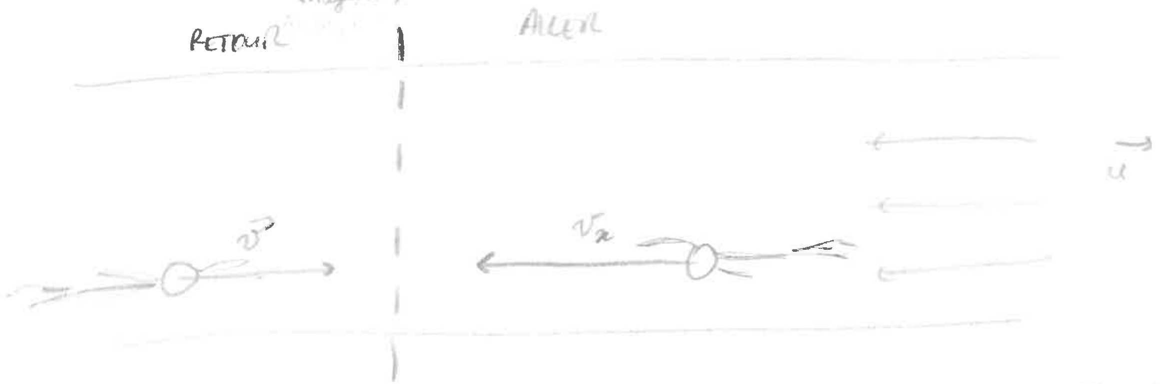


Théorème de Pythagore :

$$v_{total}^2 = v_y^2 + u^2$$

$$\Rightarrow v_y = \sqrt{v_{total}^2 - u^2} \quad \Rightarrow \quad T_1 = 2\frac{d}{\sqrt{v_{total}^2 - u^2}}$$

Système : { particule de masse m (nageur) } de vitesse v_x dans le Référentiel Terrestre supposé Galiléen

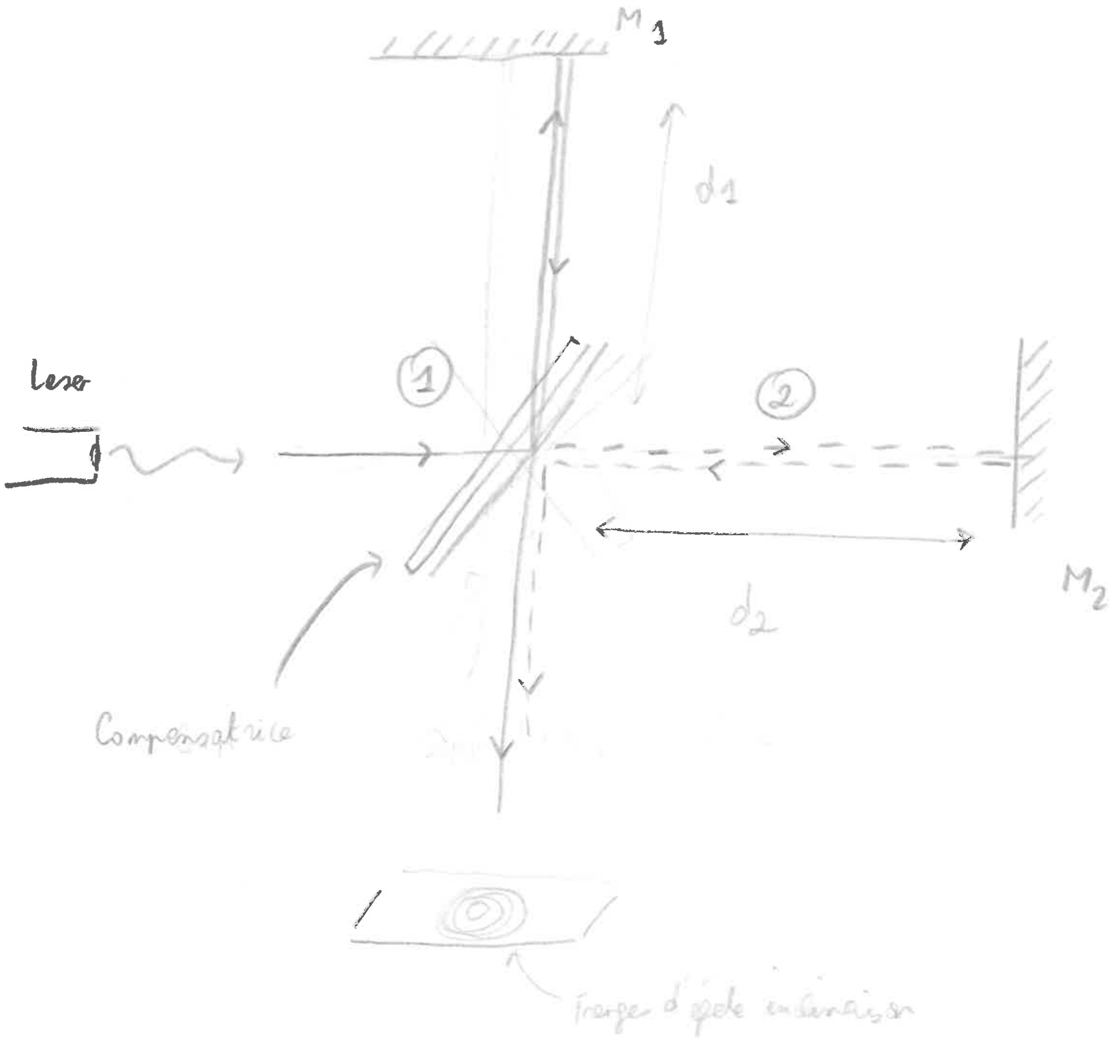


À l'aller $v_{total} = v_x + u$ Au retour $v_{total} = v_x - u$

$$\Rightarrow T_2 = \frac{d}{v_{total} - u} + \frac{d}{v_{total} + u} = \frac{2d}{v_{total}^2 - u^2}$$

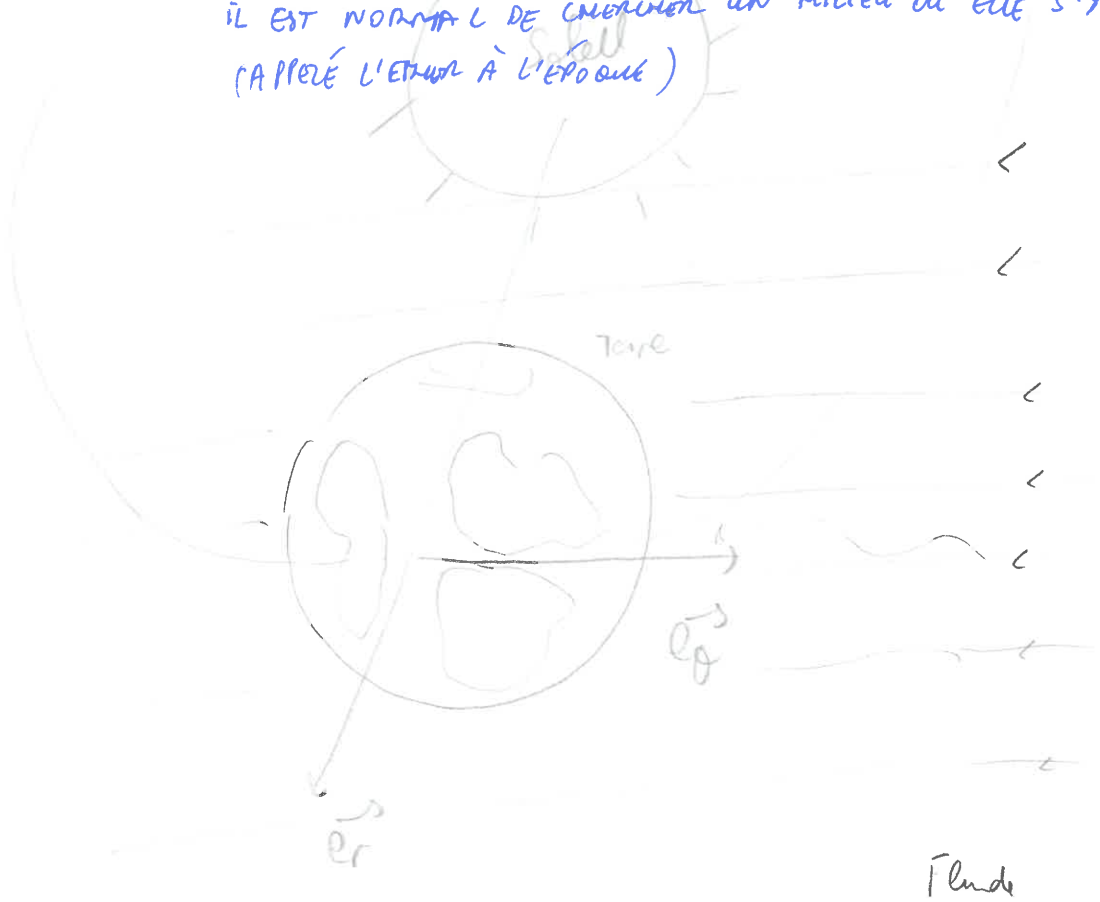
$T_1 < T_2$!!!

Interféromètre de Michelson (MONTAGE EN LAME D'AIR : $M_1 \perp M_2$)



POUR SIMPLIFIER L'ÉTUDE, ON SE PLACERA INITIALEMENT AU CONTACT OPTIQUE $\Rightarrow d_1 = d_2 = d$

HYPOTHÈSE DE DÉPART : SI LA LUMIÈRE EST UNE ONDE (EXPÉRIENCE DES TROUS D'YOUNG), IL EST NORMAL DE CHERCHER UN MILIEU OÙ ELLE S'Y PROPAGE (APPELÉ L'ÉTHER À L'ÉPOQUE)



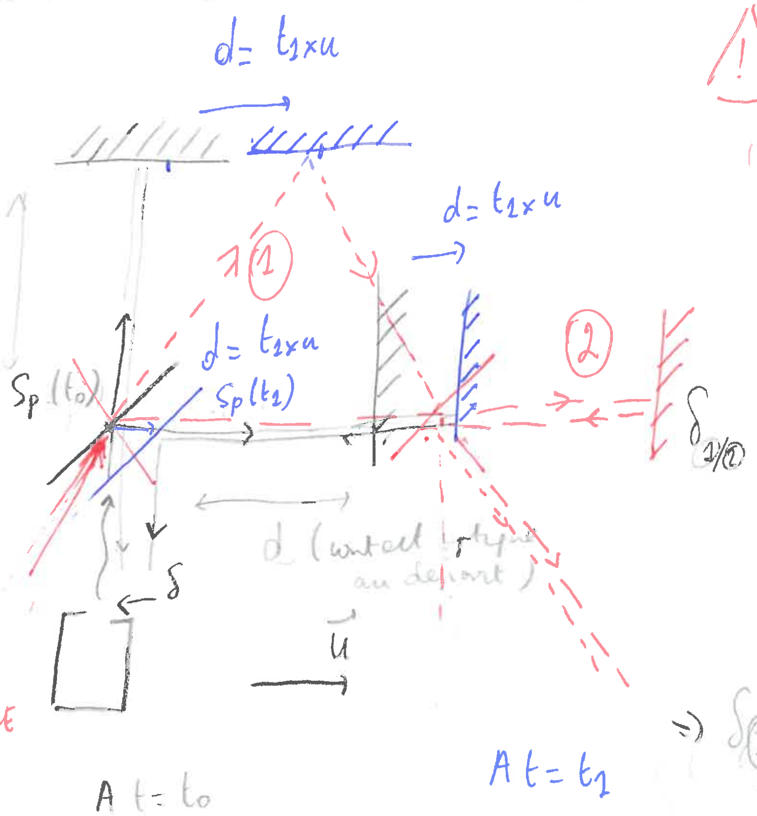
$\vec{v}_{Terre} = v_{Terre} \cdot \vec{e_\theta}$

Placer un des bras de l'interféromètre colinéaire à $\vec{v}_{Terre}$ pour simplifier l'étude

⚠ ⚠ ⚠

SCHÉMAS FAUX :

SI LA LUMIÈRE EST COMME UNE PARTICULE, ELLE SE PROPAGE COMME UNE PERSONNE DANS UNE RIVIÈRE DONC SON TRAJET CHANGE D'ANGLE (NE CONTINUE PAS TOUT DROIT !!!)



⚠ ⚠ ⚠ IL NE FAUT PAS CONFONDRE DISTANCE ENTRE LA SÉPARATRICE ET LES MIROIRS QUI EST FIXE AVEC DIFFÉRENCE DE MARCHE QUI CORRESPOND AU TRAJET DE L'ONDE LUMINEUSE QUI VARIE ENTRE LES 2 BRAS

$\delta_{1/2} = (S\,Sp_1 + Sp_1 M_1 + M_1 Sp_1 + Sp_1 E)$

$\ominus (S\,Sp_1 + Sp_1 M_2 + M_2 Sp_1 + Sp_1 E)$

$\Rightarrow \delta_{1/2} = Sp_1 (M_1 - M_2) + (M_1 - M_2) Sp_1$

$= 2\,Sp_1 (M_1 - M_2)$

Il est préférable de modifier la vitesse : LES DISTANCES d NE CHANGENT PAS

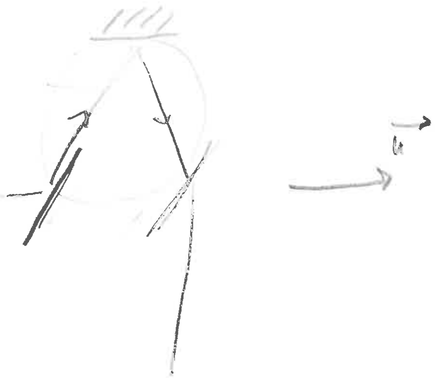
C'EST LA DIFFERENCE DE MARCHE ET LES TEMPS DE PROPAGATION QUI CHANGENT

– Pour le bras

$$d_{aller-retour} = 2d \quad \text{et} \quad T_{aller-retour ①} = \frac{d}{c+u} + \frac{d}{c-u} = \frac{d}{c^2-u^2} = \frac{d}{c^2\left(1-\frac{u^2}{c^2}\right)}$$

⚠⚠⚠ NE CHANGE PAS

– Pour le bras



$$d_{aller-retour} = 2d \quad \text{et} \quad T_{aller-retour ②} = \frac{2d}{\sqrt{c^2-u^2}} = \frac{2d}{c\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

⚠⚠⚠ NE CHANGE PAS

$$T_{aller-retour ①} \simeq \frac{2d}{c}\left(1+\frac{u^2}{c^2}\right)$$

D.L. d'ordre 1

$$T_{aller-retour ②} \simeq \frac{2d}{c}\left(1+\frac{u^2}{2c^2}\right)$$

D.L. d'ordre 1

$$\Rightarrow T_2 - T_1 \simeq \frac{du^2}{c^3}$$

$$\Rightarrow \delta_{2/1} = c(T_2-T_1) = \frac{du^2}{c^2}$$

et l'ordre d'interférence $p = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{k}{2\pi}\delta_{2/1}$ ($\frac{k}{2\pi} = 1/\lambda$)

$$p = \frac{du^2}{\lambda c^2}$$

Application Numérique : $p = \frac{\delta}{\lambda_{\text{éther}}} \approx \frac{\delta}{\lambda_0}$

Car on pensait que le vide est rempli d'éther

vitesse de rotation de la terre en $m.s^{-1}$

$$p = \frac{(3.10^4)^2}{(3\,10^8)^2} \times \frac{10}{5.10^{-7}} \simeq 0,2$$

$\Rightarrow$ décalage de ???

$\Rightarrow \delta = 10^{-8}$ m ... !!!

δ EST INDÉTECTABLE PAR DES MÉTHODES DE MESURE SUR LA DIFFÉRENCE DE DISTANCE ENTRE LES 2 BRAS

CETTE TRÈS PETITE DIFFÉRENCE DE MARCHE S'EXPLIQUE CAR

$u_{Terre} << c^2$

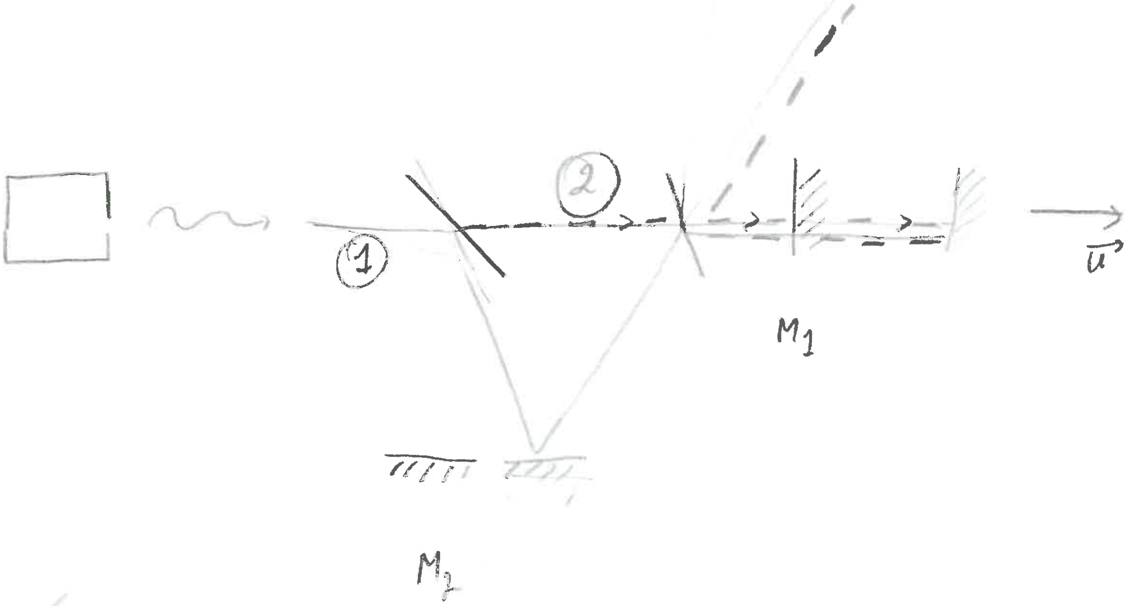
INTERPRÉTATION PERSONNELLE : POUR MOI IL FAUT SE PLACER AU CONTACT OPTIQUE MAIS CELA INCLUE DÉJÀ LA CORRECTION DE DISTANCE SUR L'UN DES BRA

EN PRATIQUE QUAND ON RÈGLE LE MICHELSON AU CONTACT OPTIQUE, ON INCLUE FORCÉMENT LA CORRECTION DE DISTANCE SUR L'UN DES BRAS (SI L'ÉTHER EXISTAIT)

IL SUFFIRAIT ALORS DE MESURER LA DIFFÉRENCE DE DISTANCE ENTRE LES 2 BRAS PAR UN MOYEN EXTERNE (RÈGLE, ...) MAIS CETTE DIFFÉRENCE EST BEAUCOUP TROP PETITE POUR POUVOIR

AUTRE SOLUTION : MESURER UN ANGLE EXTERNE AU LIEU D'UNE DISTANCE :

Si on fait tourner l'interféromètre de 90° (on tourne les bras de 90°)



D'après les résultats précédents :

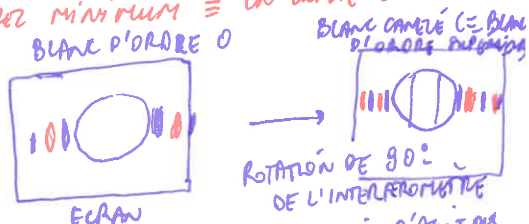
il faut alors faudrait donc observé que $T_1' = T_2$ et $T_2' = T_1$

$$\Rightarrow \delta'_{2/1} = 2\,\delta_{1/2}$$

$$\Rightarrow p' = 0+2$$

Si précédemment on était au contact optique, une rotation de 90° rajoute deux ordres d'interférence

MAIS PLUS GÉNÉRALEMENT, SI L'INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON ÉTAIT AU CONTACT OPTIQUE, TOUTE ROTATION INTRODUIT UNE DIFFÉRENCE DE MARCHE → SE PLACER EN BROUILLAGE TEMPOREL MINIMUM ≡ EN LUMIÈRE BLANCHE



NON OBSERVÉ EN PRATIQUE !!

HYPOTHÈSE POUR EXPLIQUER QUE $p' = p$:

- LA MESURE N'EST PAS ASSEZ PRÉCISE
- LA VITESSE DE ROTATION DE LA TERRE EST ERRONÉE (PEU PROBABLE CAR IL S'AGIT DES LOIS DE NEWTON)
- LE RÉFÉRENTIEL TERRESTRE EST IMMOBILE PAR RAPPORT À L'ÉTHER

CAR LA CÉLÉRITÉ DE LA LUMIÈRE EST c DANS L'ÉTHER MAIS AUSSI DANS LE RÉFÉRENTIEL TERRESTRE ⇒ LA TERRE BOUGE AVEC L'ÉTHER

- LA VITESSE DE LA LUMIÈRE NE DÉPEND PAS DU RÉFÉRENTIEL

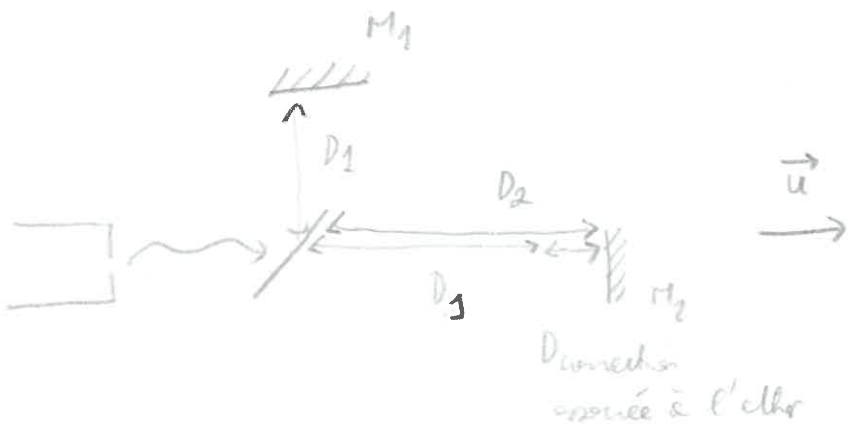
$p = 0{,}2$ et non 1, le spectre sur l'écran ne devrait pas aller jusqu'au blanc cannelé ($p=1$) même en tournant l'interféromètre de 90° !!!

⇒ EN 1905 : POSTULAT D'ALBERT EINSTEIN : LA VITESSE DE LA LUMIÈRE EST IDENTIQUE DANS TOUS LES RÉFÉRENTIELS, POSTULAT QUI POSE LES BASES DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE

+ VIDÉO FEYNMAN

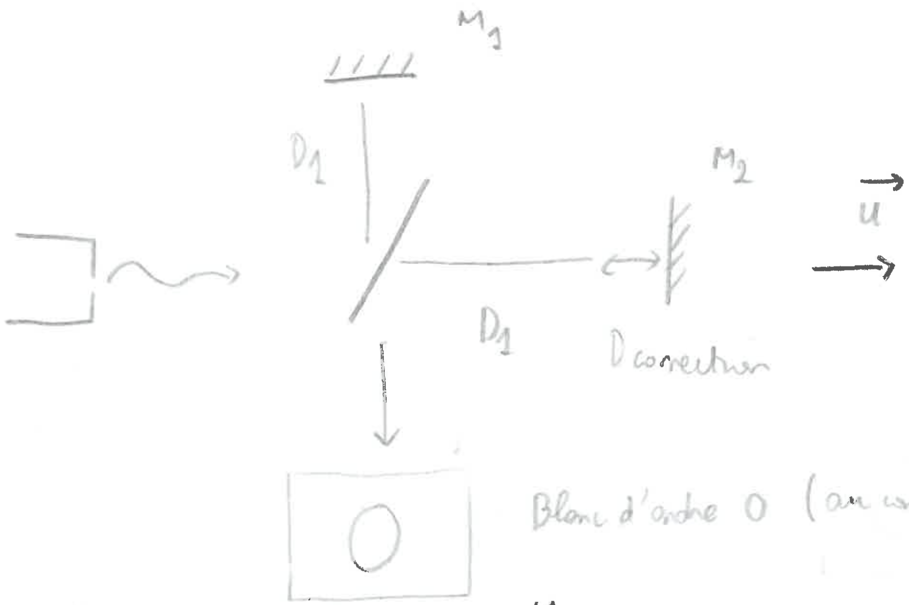
⚠ ⚠ ⚠ SI L'ON SUPPOSE (AVANT DE FAIRE L'EXPÉRIENCE) QUE L'ÉTHER EXISTE ALORS LE FAIT DE SE PLACER AU CONTACT OPTIQUE (AVEC UNE SOURCE DE LUMIÈRE QUI DOIT ÊTRE TRÈS COHÉRENTE COMME PAR EXEMPLE LA LUMIÈRE BLANCHE POUR DES MESURES DE DISTANCE TRÈS PRÉCISES),

LE CONTACT OPTIQUE SUPPOSE DÉJÀ QUE $D_1 \neq D_2$ (SI L'ON SE PLACE DANS LE CAS OÙ L'ÉTHER EXISTE)

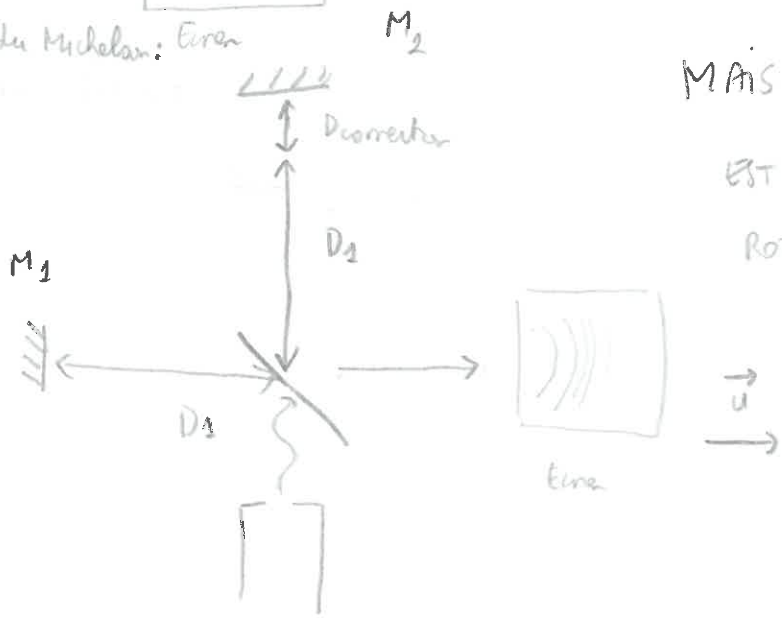


PUIS EN TOURNANT L'INTERFEROMÈTRE DE 90°,

LA DIFFÉRENCE DE MARCHE SERAIT MODIFIÉE SI L'ETHER EXISTAIT



Après une rotation de 90° du Michelson: Écran



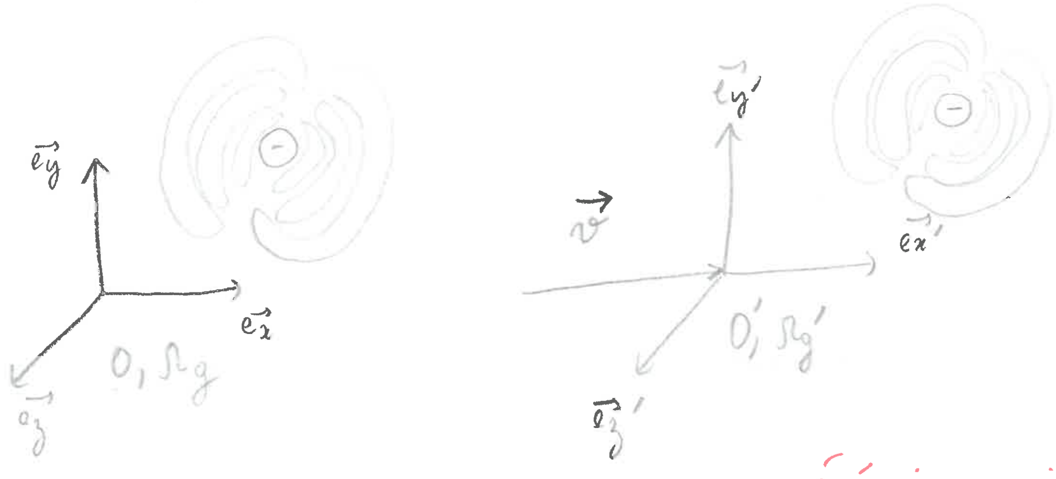
MAIS $\vec{u} = \vec{v}_{Terre/soleil}$

EST INCHANGÉE PAR

ROTATION DU MICHELSON

Il y avait déjà à l'époque d'Einstein, une transformée qui maintenait constante la vitesse de la lumière lors d'un changement de référentiel : la Tranformée de Lorentz

Initialement Lorrentz avait développé sa Transformée pour que les équations de Lorentz s'écrivent de la même manière dans 2 Référentiels Galiléens $\mathcal{R}$ et $\mathcal{R}'$ dont l'un est en translation rectiligne uniforme par rapport à l'autre à une vitesse v



⚠ ⚠ ⚠ LA TRANSFORMATION DE LORENTZ TRANSFORME UN RÉFÉRENTIEL GALILÉEN EN UN AUTRE RÉFÉRENTIEL GALILÉEN CAR v ~~relativiste~~ EST RECTILIGNE ET UNIFORME (CE N'EST NI UNE ACCÉLÉRATION NI UNE ROTATION)

Transformation de Lorentz dans la direction x : (EN BASE CARTÉSIENNE)

$$(TL) \begin{cases} x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma\left(1 - \dfrac{vx}{c^2}\right) \end{cases} \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

MAIS POUR PASSER D'UN SYSTÈME DE COORDONNÉES À L'AUTRE LA LOI DE COMPOSITION DES VITESSES N'EST PLUS VALABLE (⇒ LA TRANSFORMATION DE GALILÉE N'EST PLUS VALABLE !!!)

La Transformation de Lorentz inverse dans la direction x : (EN BASE CARTÉSIENNE)

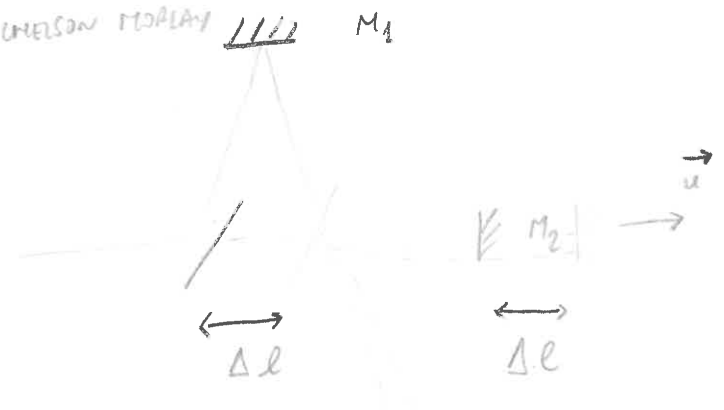
$$(TL^{-1}) \begin{cases} x = \gamma(x' + vt') \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \gamma\left(t' + \dfrac{vx'}{c^2}\right) \end{cases}$$

⚠ ⚠ ⚠ LA TRANSFORMATION DE LORENTZ MODIFIE DONC :

- LA DISTANCE DANS LA DIRECTION DE LA VITESSE
- LES TEMPS NE SONT PAS LES MÊMES ENTRE LES 2 RÉFÉRENTIELS (⇒ CHAQUE RÉFÉRENTIEL A SA PROPRE HORLOGE)

Comment la Transformée de Lorentz permet d'expliquer l'invariance de la vitesse de la lumière dans l'expérience de Michelson Morley

MERCI CHAT GPT D'AVOIR CALCULÉ DIRECTEMENT LA CONTRACTION DES DISTANCES ET LA DILATATION DU TEMPS DIRECTEMENT SUR L'EXPÉRIENCE DE MICHELSON MORLAY



$$t_{(2)} = t_{//} = \frac{D}{c-u} + \frac{D}{c+u} = \frac{2D}{c}\,\frac{1}{1-\frac{u^2}{c^2}}$$

$$t_{(1)} = t_{\perp} = \frac{2D}{c}\,\frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

$$\Rightarrow t_{//} = t_{\perp} \cdot \underbrace{\frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}}_{=\gamma}$$

DILATATION DU TEMPS

ou en utilisant uniquement les distances

$$L_{(2)} = L_{//} = \frac{2D}{\frac{2D}{c}\,\frac{1}{1-\frac{u^2}{c^2}}} = c\left(1-\frac{u^2}{c^2}\right)$$

$$L_{(1)} = L_{\perp} = \frac{2D}{\frac{2D}{c}\,\frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}} = c\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$$

$$\Rightarrow L_{//} = L_{\perp} \times \sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$$

En utilisant la forme matricielle de la Transformée de Lorentz :

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \underbrace{\begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\Lambda} \begin{pmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} \qquad \text{avec } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \text{ et } \beta = \frac{v}{c}$$

($\det(\Lambda) = +1$, ce qui signifie que la Transformation de Lorentz inverse est possible)

Et en remarquant que $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \Rightarrow \gamma^2 - (\gamma\beta)^2 = 1$

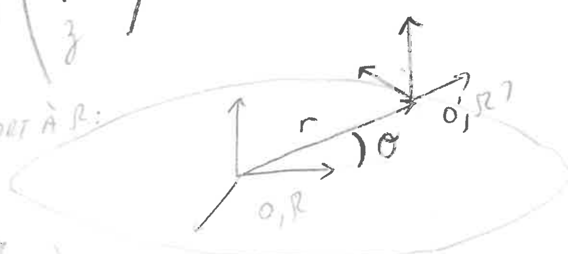
En posant $\begin{cases} \gamma = \cosh(\phi) \\ \gamma\beta = \sinh(\phi) \end{cases}$ (ϕ rapidité)

$\left(\Rightarrow \tanh(\phi) = \dfrac{\sinh(\phi)}{\cosh(\phi)} = \beta = \dfrac{v}{c} \right)$

La matrice se réécrit comme

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cosh(\phi) & -\sinh(\phi) & 0 & 0 \\ -\sinh(\phi) & \cosh(\phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

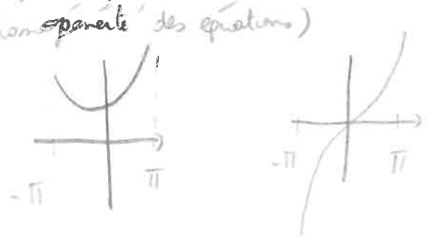
SIMILAIRE À UNE MATRICE DE ROTATION DE R' PAR RAPPORT À R :



$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ t' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix}$$

Mais cette notation :

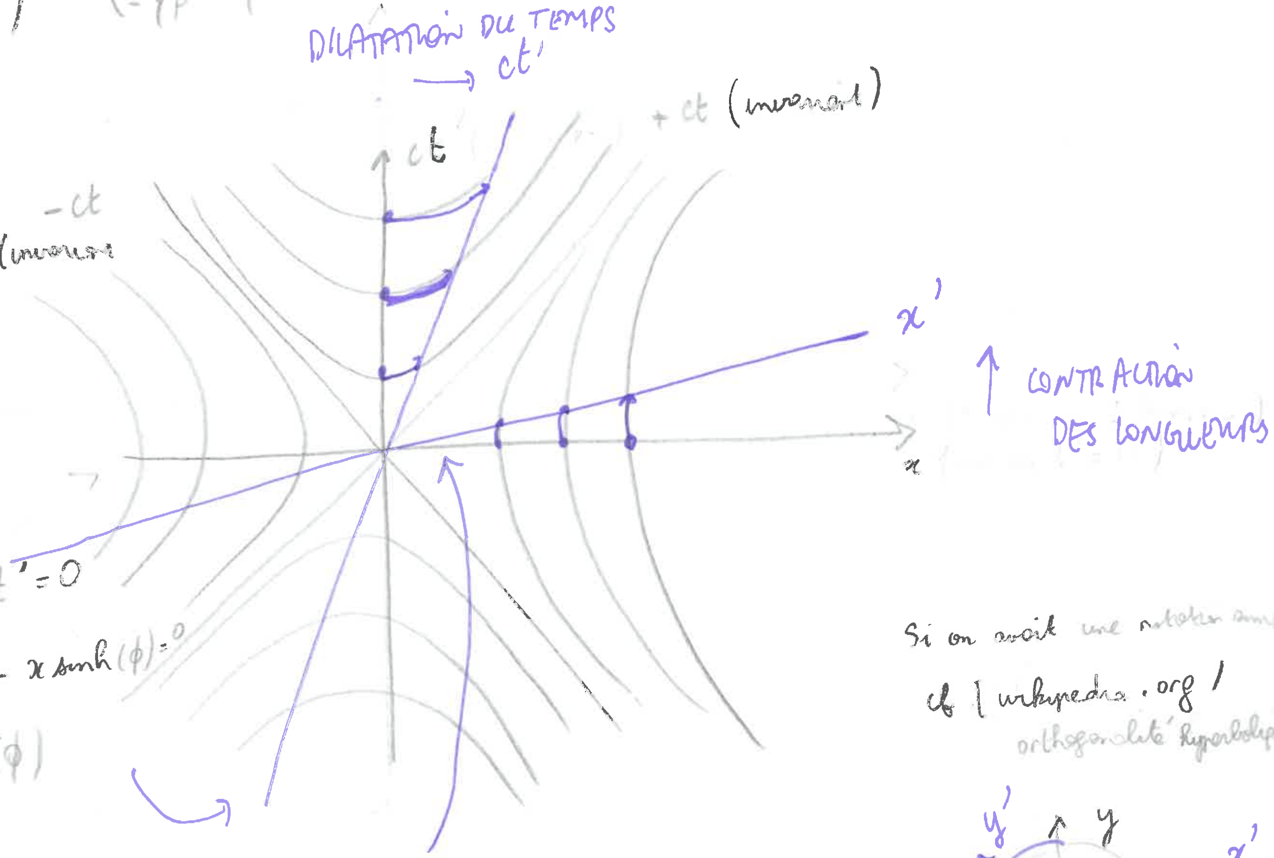
- concerne une rotation d'une dimension d'espace par rapport à une dimension de temps (multipliée par la vitesse de la lumière pour l'homogénéité des équations)
- il s'agit de fonctions hyperboliques



QUI DIVERGENT ≡ TENDENT VERS L'INFINI POUR CERTAINES VALEURS !!!

Exemple en 1 Dimension :

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\gamma\beta \\ -\gamma\beta & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\phi) & -\sinh(\phi) \\ -\sinh(\phi) & \cosh(\phi) \end{pmatrix}$$



Axe où $ct' = 0$

$\Rightarrow ct\cosh(\phi) - x\sinh(\phi) = 0$

$\Rightarrow ct = x\tanh(\phi)$

$\Rightarrow ct = \frac{v}{c} x$

Axe où $x' = 0$

$\Rightarrow x' = x\cosh(\phi) - ct\sinh(\phi) = 0$

$\Rightarrow x\cosh(\phi) = ct\sinh(\phi)$

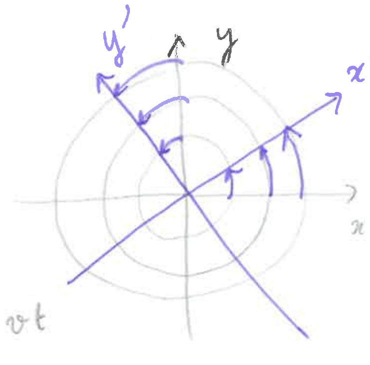
$\Rightarrow x = ct\tanh(\phi) = ct \times \frac{v}{c} = vt$

CET AXE EST LA TRAJECTOIRE DU RÉFÉRENTIEL R'

Si on voit une rotation simple

cf [wikipedia.org]

orthogonalité hyperbolique



Quantité de mouvement relativiste :

R_1 : Referentiel du laboratoire supposé Galiléen

R_2 : Referentiel en mouvement à la vitesse v par rapport à R_1 le long de l'axe

u_1 : vitesse de la particule mesurée dans R_1

u_2 : vitesse de la particule mesurée dans R_2

ON SUPPOSE QUE LES AXES SONT PARALLÈLES ET COINCIDENT À L'ORIGINE

$t = t' = 0$

1) Expression de u_2 dans R_2 :

$$u_2 = \frac{dx'}{dt'}$$

$$\Rightarrow dx' = u_2 \, dt'$$

2) Calcul de dx et dt dans R_1 GRÂCE AUX TRANSFORMÉES DE LORENTZ INVERSES :

Dans R_1 : $x = \gamma(x' + vt')$

$$\Rightarrow dx = d(\gamma(x' + vt'))$$

$$= \gamma(dx' + v\,dt')$$

$$= \gamma(u_2\,dt' + v\,dt)$$

$$= \gamma(u_2 + v)\,dt$$

⚠ ⚠ ⚠ MÊME SI R' EST AUSSI UN REFERENTIEL GALILÉEN SI R EST GALILÉEN CAR R' EST EN TRANSLATION RECTILIGNE PAR RAPPORT À R MAIS IL N'EST PLUS POSSIBLE DE PASSER DE LA VITESSE DANS R_2 À LA VITESSE DANS R_1 PAR LA LOI D'ADDITIVITÉ DES VITESSES !!! (MERCI COPILOT !!!)

et

$$t = \gamma\left(t' + \frac{v}{c^2}x'\right)$$

$$\Rightarrow dt = \gamma\left(dt' + \frac{v}{c^2}dx'\right)$$

$$\Rightarrow dt = \gamma\left(1 + \frac{v u_2}{c^2}\right)dt'$$

3) Calcul de u_1 dans R_1 :

$$u_1 = \frac{dx}{dt} = \frac{\gamma(u_2 + v)\,dt}{\gamma\left(1 + \frac{v u_2}{c^2}\right)dt} \quad \text{ou} \quad \left(\frac{v - u_2}{1 - \frac{v u_2}{c^2}}\right)$$

(si la particule se déplace vers les $-x$ dans R_1)

Chocs de 2 particules de même masse et de vitesse opposée dans R_2

IDÉE GÉNIALE D'EINSTEIN,
LES LOIS DE NEWTON
DOIVENT ÊTRE RESPECTÉES
DANS TOUS LES RÉFÉRENTIELS
GALILÉENS

Conservation de la quantité de mouvement dans R_2

$$p_1' + p_2' = 0$$

$$\Rightarrow -m u_2 + m u_2 = 0$$

$$\Rightarrow p_1 + p_2 = 0$$

$$\Rightarrow m \frac{v + u_2}{1 + \frac{v u_2}{c^2}} + m \frac{v - u_2}{1 - \frac{v u_2}{c^2}} = 0$$

POUR QUE LES TERMES S'ANNULENT, IL FAUT APPLIQUER UN TERME CORRECTEUR DIFFÉRENT À CHAQUE MASSE (AVEC $\gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$) :

ON PEUT MONTRER QUE

$$\Rightarrow \underbrace{m \gamma(v)}_{m_{R_1}} \left(\frac{1 - \frac{u_2 v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u_2^2}{c^2}}} \right) u_2 - \underbrace{m \gamma(v)}_{m_{R_2}} \left(\frac{1 - \frac{u_2 v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u_2^2}{c^2}}} \right) u_2 = 0$$

LES TERMES SONT ALORS IDENTIQUES

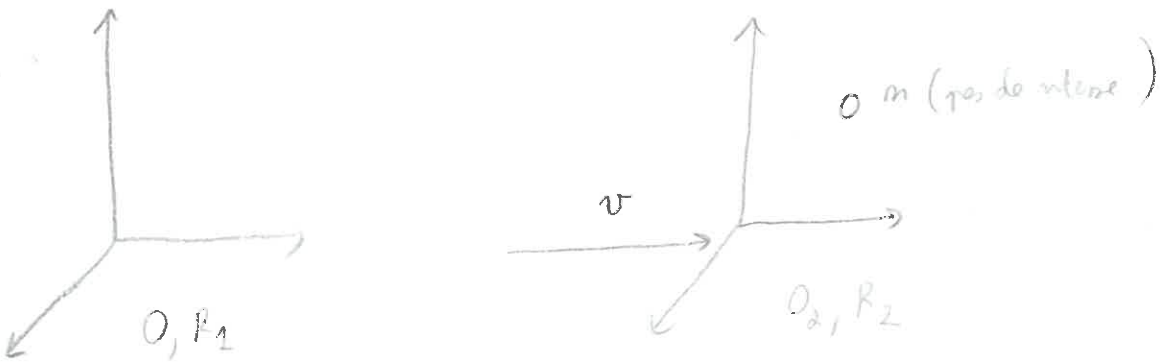
$\Rightarrow$ DANS R_2 : $P_{TOTAL} = 0$ et $p_1' = m u_2$, $p_2' = m u_1$)

$\Rightarrow$ DANS R_1 : $P_{TOTAL} = 0$ et $p_1 = m \gamma(v) \frac{1 - \frac{u_2 v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u_2^2}{c^2}}}$ $p_2 = \ominus m \gamma(v) \frac{1 - \frac{u_2 v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u_2^2}{c^2}}}$

⚠ ⚠ ⚠ CE N'EST PAS LA MÊME QUANTITÉ DE MOUVEMENT DANS CHAQUE RÉFÉRENTIEL MAIS DANS LES 2 RÉFÉRENTIELS LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT SE CONSERVE DANS CHAQUE RÉFÉRENTIEL

(MERCI COPILOT !!!)

Pour une particule au repos (sans vitesse u_2).



$m\gamma(v)$ dans R_1

$m \dfrac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

← CORRECTION RELATIVISTE APPORTÉE À LA MASSE D'UNE PARTICULE AU REPOS !!!

m dans R_2

⚠ ⚠ ⚠

MÊME SI LA PARTICULE A UNE VITESSE u_2 DANS R_2 NON RELATIVISTE, LA CORRECTION RELATIVISTE NE CHANGE PAS !!!

Energies relativistes :

$$p = \gamma m v \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$ ← PAS DE u_2 !!!

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(m\gamma v)}{dt} = m\frac{d(\gamma v)}{dt} = m\frac{d(\gamma v)}{dv}\frac{dv}{dt} = m\gamma^3\frac{dv}{dt}$$

$$\Rightarrow E_c = \int F\,dr = \int \frac{dp}{dt}dr = \int m\gamma^3\frac{dv}{dt}\,dr = \int m\underbrace{\gamma^3 v\,dv}_{= c^2 d\gamma}$$

$$\Rightarrow E_c = \underbrace{m\gamma}_{m_R} c^2 + \text{Constante}$$

↳ se détermine dans le cas où $v = 0$ ($\ominus$ énergie potentielle ???)

Par convention (et par cohérence avec l'invariance de masse au repos)

E_m

$$C = -\underbrace{m}_{m_0} c^2$$

m_0 = masse au repos sans correction relativiste

$$\Rightarrow E_m = m\gamma c^2 = E_c + E_p$$

$$\Rightarrow E_m = \underbrace{m\gamma}_{m_R} c^2 = E_c + \underbrace{m}_{m_0} c^2$$ où en appellant m_0 la masse au repos $E_m = m_0 \gamma c^2 = E_c + m_0 c^2$

(m_0 masse au repos)

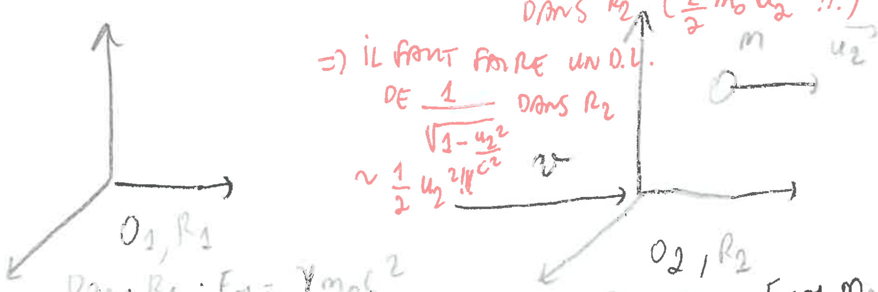
$$\Rightarrow E_c = m_0\gamma c^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2(\gamma - 1)$$

Interprétation physique :

OÙ EST PASSÉE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE NON RELATIVISTE DANS R_2 ($\frac{1}{2}m_0 u_2^2$???)

$\Rightarrow$ IL FAUT FAIRE UN D.L. DE $\frac{1}{\sqrt{1-u_2^2}}$ DANS R_2

$\sim \frac{1}{2}u_2^2/c^2$



Dans R_1 : $E_m = \gamma m_0 c^2$

Dans R_2 : $E_m \simeq m_0 c^2 + \frac{1}{2}m_0 u_2^2$