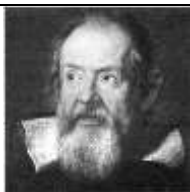


## 1905 : il faut changer les lois de la Physique

Galilée et Maxwell sont deux physiciens qui, à trois siècles d'intervalle, ont posé les bases de deux branches de la physique : la mécanique dite « classique » pour le premier, l'électromagnétisme pour le second. Nous allons voir comment la confrontation de ces deux théories a conduit les physiciens du XX<sup>ème</sup> siècle à rénover leurs théories et modèles.

### La mécanique de Galilée (1564-1642)



La vitesse d'un système ne peut être définie que relativement à un référentiel : on parle de la relativité galiléenne.

Il n'existe pas de référentiel « absolu » : les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens : si une expérience de mécanique est conduite et étudiée dans un référentiel galiléen, son résultat ne dépend pas de la vitesse de ce référentiel.

Ce principe sert de fondement à la mécanique de Newton.

### L'électromagnétisme de Maxwell (1831-1879)



La lumière est une onde électromagnétique.

La théorie des ondes électromagnétiques de Maxwell permet de prévoir théoriquement sa célérité indépendamment du référentiel d'étude : cela induit donc que quel que soit le référentiel d'étude et quelle que soit la vitesse de la source

$$c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$$

### 1<sup>ère</sup> Partie : deux théories se contredisent

#### ► Les conséquences du principe de relativité galiléenne

On considère un TGV qui avance à une vitesse  $v = 300 \text{ km.h}^{-1} = 83,3 \text{ m.s}^{-1}$  par rapport au sol. Le passager est assis sur un siège.

1. Peut-on affirmer que « le passager est immobile » ? Que peut-on affirmer exactement ?

Le passager, pour se rendre à la voiture bar, marche vers l'avant du train à une vitesse de  $5 \text{ km.h}^{-1}$ .

2. Quelle est sa vitesse par rapport au train ? par rapport au sol ?
3. Même question, lorsque le passager quitte la voiture bar pour retourner à sa place.

#### ► Là où « ça coince »

Le passager précédent, toujours dans le TGV, est à nouveau assis et regarde dans le sens contraire au sens de la marche du TGV. Il éclaire un document placé devant lui avec une lampe de poche.

1. Si on étend le principe de relativité galiléenne à la lumière, à quelle vitesse la lumière émise par la lampe se propage-t-elle par rapport au TGV ? Par rapport au sol ?
2. Expliquer pourquoi la réponse précédente n'est pas compatible avec la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell.

### 2<sup>ème</sup> partie : l'hypothèse de l'éther

Nous avons vu qu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, les lois de l'électromagnétisme ne semblent pas valables dans tous les référentiels. Cela suggère qu'il existe un référentiel « absolu », le seul dans lequel les lois de l'électromagnétisme sont valables. Mais cela est en totale contradiction avec le principe de Galilée !

Pour sortir de cette impasse, les physiciens avaient trois solutions

- **solution ①** : conserver le principe de Galilée, donc devoir corriger la théorie des ondes électromagnétiques ;
- **solution ②** : conserver la théorie des ondes électromagnétiques de Maxwell, donc corriger les lois de la mécanique ;

– **solution ③** : conserver les deux théories et admettre que la mécanique satisfait le principe de Galilée mais pas l'électromagnétisme. Les lois de la mécanique sont valides dans tout référentiel galiléen mais pas celles de l'électromagnétisme.

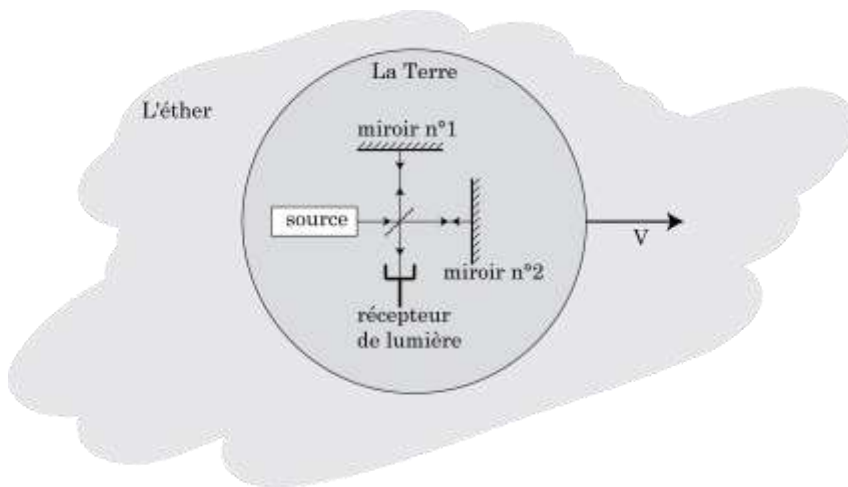
Seulement voilà : le principe de Galilée était à l'origine de la mécanique de Newton, grâce à laquelle tous les mouvements terrestres et astronomiques connus avaient pu être correctement interprétés : il semblait impossible de remettre tout cela en cause. De même, la théorie de Maxwell avait permis d'expliquer nombre de phénomènes électriques, magnétiques et lumineux : il était tout aussi impensable de la remettre en question. C'est donc la solution ③ qui a d'abord été choisie.

Les physiciens qui ont fait ce choix ont énoncé 3 hypothèses :

- 1) Il existe un fluide appelé l'« éther », immobile et tellement peu dense que les objets (planètes, etc.) peuvent s'y déplacer sans être freinés.
- 2) L'éther est le référentiel absolu : la théorie des ondes électromagnétiques n'est valable que par rapport à l'éther, donc **la célérité de la lumière vaut  $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  seulement par rapport à l'éther.**
- 3) La célérité de la lumière, dans un référentiel en mouvement par rapport à l'éther, se calcule selon le théorème d'addition des vitesses de Galilée.

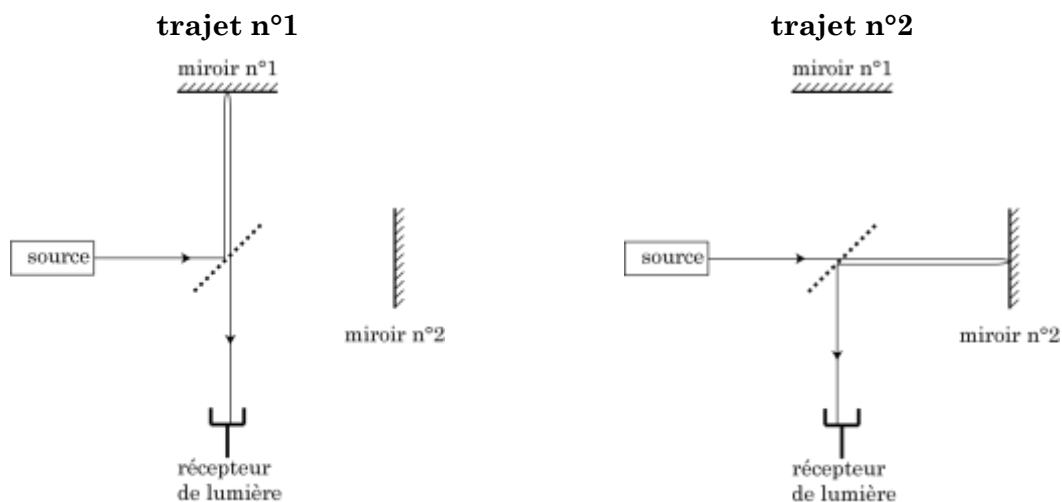
### L'expérience de Michelson et Morley

Deux physiciens, Michelson et Morley, ont alors entrepris de mesurer la vitesse de la Terre par rapport à l'éther. Ils ont pour cela conçu le système schématisé ci-dessous, appelé « interféromètre », composé d'une source de lumière, de deux miroirs et d'une lame semi-réfléchissante, posé horizontalement sur le sol terrestre. Ils étaient partisans de l'idée selon laquelle la Terre était en mouvement à la vitesse  $V$  dans l'éther, fluide immobile.



Bien sûr ce schéma ne respecte aucune échelle mais l'orientation du dispositif par rapport à la vitesse de la Terre est respectée.

Dans l'interféromètre, la lumière était divisée en deux faisceaux qui suivaient l'un ou l'autre de ces trajets :



Les deux miroirs étaient à égale distance de la lame semi-réfléchissante.

Enfin, l'interféromètre permettait, grâce au phénomène d'interférences lumineuses (que nous n'étudions pas ici), de mesurer l'écart de temps  $\tau$  entre le parcours 1 et le parcours 2 de la lumière.

► **Questions**

1. Selon l'hypothèse de l'éther, la lumière a-t-elle une célérité de valeur  $c$  par rapport à la Terre ? Pourquoi ?
2. Expliquer pourquoi Michelson et Morley s'attendaient à mesurer un écart de temps entre les 2 parcours possibles de la lumière. Rédiger un court paragraphe mais aucun calcul n'est demandé.

**3<sup>ème</sup> Partie : l'évaporation de l'éther et la relativité d'Einstein**

L'expérience de Michelson et Morley n'eut pas le résultat attendu par ses auteurs. Elle eut beau être renouvelée, améliorée, etc. : l'écart de temps mesuré était toujours rigoureusement nul.

Albert Einstein a toujours prétendu avoir ignoré les travaux de Michelson et Morley. Pour lui, la notion de référentiel absolu n'avait aucun sens : il lui semblait incohérent que la mécanique puisse obéir à certaines lois et l'électromagnétisme à d'autres lois. C'est essentiellement pour cette raison, semble-t-il, qu'il énonça en 1905 un postulat qui allait bouleverser la physique.

**Le postulat d'Einstein (1879-1955)**



Les lois de la Physique sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens. La vitesse de la lumière dans le vide est indépendante du référentiel d'étude et vaut

$$c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$$

par rapport à tout référentiel galiléen.

► **Questions :**

1. Reprendre la 2<sup>ème</sup> partie en admettant cette fois le postulat d'Einstein et non plus celui de Galilée.
2. Montrer que le postulat d'Einstein permet d'interpréter le résultat de l'expérience de Michelson et Morley.
3. Expliquer pourquoi le concept d'« éther » n'est ainsi plus pertinent selon Einstein.
4. Le postulat d'Einstein est aujourd'hui toujours admis : aucune expérience n'est jamais venue le remettre en cause. Ce postulat, à partir de 1905, a conduit les physiciens à corriger certaines théories admises jusqu'alors. Est-ce l'électromagnétisme de Maxwell ou la mécanique de Galilée qu'il a fallu corriger ?

## CORRECTION DES QUESTIONS

### 1<sup>ère</sup> partie – Fin du XIX<sup>ème</sup> siècle : deux théories se contredisent

1. On considère un TGV qui avance à une vitesse  $v = 300 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} = 83,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  par rapport au sol. Le passager est assis sur un siège.  
Peut-on affirmer que « le passager est immobile » ? Que peut-on affirmer exactement ?  
→ Affirmer qu'un objet est immobile n'a de sens que si on précise dans quel référentiel on étudie son mouvement. Ce qu'on peut affirmer est que le passager est immobile **par rapport au TGV**.
2. Le passager, pour se rendre à la voiture bar, marche vers l'avant du train à une vitesse de  $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Quelle est sa vitesse par rapport au train ? par rapport au sol ?  
→ Par rapport au TGV, le passager avance à  $5 \text{ km/h}$  ;  
par rapport au sol, le passager avance à  $300 + 5 = 305 \text{ km/h}$ .
3. Même question, lorsque le passager quitte la voiture bar pour retourner à sa place  
→ Par rapport au TGV, le passager avance toujours à  $5 \text{ km/h}$  ;  
par rapport au sol, le passager avance à  $300 - 5 = 305 \text{ km/h}$ .
4. **Prévision d'après la relativité galiléenne** : si on étend le principe de relativité galiléenne à la lumière : à quelle vitesse la lumière émise par la lampe se propage-t-elle par rapport au TGV ? Par rapport au sol ?  
→ Si on étend le principe de relativité galiléenne à la lumière, alors la vitesse de la lumière dépend elle aussi du référentiel d'étude. On a alors :  
 $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$  par rapport au train  
 $c' = c - v = 299\,792\,458 - 83 = 299\,792\,375 \text{ m/s}$  par rapport au sol
5. Expliquer pourquoi la réponse précédente n'est pas compatible avec la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell.  
→ Il est indiqué en préambule que les équations de Maxwell donnent une seule valeur possible de la célérité de la lumière, égale à  $c$  (et non  $c'$ ) quel que soit le référentiel. Or d'après le calcul précédent, la célérité de la lumière dépend du référentiel choisi.  
Cela suggère que les équations de Maxwell sont valables par rapport à la Terre mais pas par rapport au TGV.

### 2<sup>ème</sup> partie – L'hypothèse de l'« éther »

1. Selon l'hypothèse de l'éther, la lumière a-t-elle une célérité de valeur  $c$  par rapport à la terre ? Pourquoi ?  
→ La célérité de la lumière vaut  $c$  par rapport à l'éther. Comme la Terre est en mouvement par rapport à l'éther, sa célérité est différente dans le référentiel terrestre, pour la même raison que le piéton de la partie précédente avance à des vitesses différentes selon qu'on étudie son mouvement par rapport au train ou par rapport au sol.
2. Expliquer pourquoi Michelson et Morley s'attendaient à mesurer un écart de temps entre les 2 parcours possibles de la lumière. Rédiger un court paragraphe mais aucun calcul n'est demandé.  
→ Pour Michelson et Morley la Terre est en mouvement par rapport à l'éther.  
L'un des deux bras est placé dans la même direction que le mouvement de la Terre dans l'éther et l'autre lui est perpendiculaire.  
La lumière n'aura pas la même célérité, par rapport à la Terre, sur chacune des portions de son trajet.  
Donc, en moyenne, sa célérité sur le trajet 1 sera différente de celle sur le trajet 2.

**Note :** *un calcul du temps de parcours aurait été possible à condition que les élèves maîtrisent la composition galiléenne des vitesses sous sa forme vectorielle. Cela n'est sans doute pas totalement inenvisageable mais il nous a semblé que l'enjeu de l'activité était ailleurs et que les élèves pouvaient comprendre, sans faire de calcul, pourquoi on a pu penser que les deux trajets de la lumière n'auraient pas la même durée.*

### 3<sup>ème</sup> partie – 1905 : fin de l'hypothèse de l' « éther » et relativité d'Einstein

1. Répondre à nouveau à la question (1.b) en admettant cette fois le postulat d'Einstein et non plus celui de Galilée.  
→ Selon Einstein la célérité de la lumière vaut  $c$  dans tous les référentiels :  
 $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  par rapport au train  
 $c' = c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  par rapport au sol
2. Montrer que le postulat d'Einstein permet d'interpréter le résultat de l'expérience de Michelson et Morley.  
→ Selon de postulat d'Einstein la célérité de la lumière est indépendante du référentiel d'étude. Elle n'est donc pas affectée par le mouvement de la Terre, donc sa célérité est exactement la même sur toutes les portions de son trajet dans l'interféromètre de Michelson et Morley. Donc il n'y a aucun décalage temporel entre les deux faisceaux.  
**Note :** *explication très simpliste, puisque nous ne tenons pas compte de la contraction des longueurs (hors programme en terminale). Nous pensons pourtant que c'est la seule formulation à laquelle un élève de TS aura accès.*
3. Expliquer pourquoi le concept d' « éther » n'est ainsi plus pertinent selon Einstein.  
→ La notion de référentiel absolu n'a plus aucun sens, puisque la célérité de la lumière est indépendante du référentiel d'étude. Le concept d' « éther » n'a donc plus lieu d'être et sera abandonné par Einstein. **Le vide** est donc le milieu dans lequel la célérité de la lumière vaut  $c$ .
4. Le postulat d'Einstein est aujourd'hui toujours admis : aucune expérience n'est jamais venue le remettre en cause. Ce postulat, à partir de 1905, a conduit les physiciens à corriger certaines théories admises jusqu'alors. Est-ce l'électromagnétisme de Maxwell ou la mécanique de Galilée qu'il a fallu corriger ?  
→ Le postulat d'Einstein valide l'électromagnétisme, il lui donne même un caractère encore plus général puisque selon lui les lois de l'électromagnétisme sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens.  
Par contre la mécanique est à corriger, en particulier le principe de relativité de Galilée, puisque la composition des vitesses de Galilée donne des résultats incompatibles avec la constance de la vitesse de la lumière.