

Et si la vitesse de la lumière était de l'ordre de celle d'un vélo !

Jérôme Perez

29 août 2015

Ce texte est largement inspiré d'un ouvrage du célèbre physicien russe-américain GEORGES GAMOV intitulé " M. TOMPKINS au pays des merveilles" paru en 1946 aux éditions "The Macmillan Company".

Monsieur TOMPKINS était un employé de banque modèle. Ses études ne l'avaient pas mené très loin dans le domaine scientifique mais son attention fut attirée par l'affiche qui ornait l'imposante entrée de l'université : Grande conférence de vulgarisation des sciences sur le thème de l'espace et du temps - Les conséquences de la relativité. Il n'avait rien de prévu dans les deux heures qui arrivaient, il décida d'entrer...

L'amphithéâtre était cossu et bien garni. Il s'assit dans un siège confortable. Un vieux professeur, d'allure typique, entra par une porte que M. TOMPKINS n'avait pas remarquée jusque là. Il commença sa conférence sans autre forme de procès.

Mesdames et Messieurs,

A une époque très primitive de son développement, l'esprit humain a créé des notions définies d'espace et de temps dans le cadre desquelles se situent les divers événements. Ces notions se sont transmises sans changement essentiel de génération en génération, et, depuis le développement des sciences exactes, ont servi de base à la description mathématique de l'Univers. C'est peut-être le grand NEWTON qui a le premier exprimé clairement les notions classiques d'espace et de temps lorsqu'il écrivit dans ses Principia : "*L'espace absolu, par sa nature même, sans relation avec rien d'extérieur, reste toujours semblable et immuable*" et "*Le temps absolu, vrai, et mathématique, par lui-même et par sa nature propre s'écoule régulièrement sans relation avec rien d'extérieur*".

Si forte était la croyance en l'absolue exactitude de ces idées classiques qu'elles étaient considérées comme des données a priori, et aucun savant n'envisageait même la possibilité d'en douter. Toutefois, au début du XX^e siècle, il devint évident qu'un certain nombre de résultats obtenus par les méthodes les plus fines de la physique expérimentale, conduisaient à des contradictions patentées si on les interprétabat dans le cadre classique de l'espace et du temps. Ces faits engendrèrent une idée révolutionnaire dans l'esprit de l'un des plus grands physiciens, ALBERT EINSTEIN ; d'après lui il n'y avait guère de raison, sinon traditionnelle, de considérer les notions classiques d'espace et de temps comme absolument vraies, et ces notions pouvaient être modifiées pour cadrer avec notre expérience nouvelle et affinée. En effet, puisque les notions classiques d'espace et de temps ont pour base l'expérience humaine dans la vie courante, il n'est pas surprenant qu'aujourd'hui, des méthodes d'observation plus poussées montrent que ces anciennes notions sont trop grossières, peu exactes, et qu'elles n'ont pu servir dans la vie courante uniquement parce que l'écart avec les notions correctes

était assez petit. Rien d'étonnant à ce que l'élargissement du champ d'exploration de la science moderne nous conduise en des régions où ces écarts deviennent si grands que les notions classiques ne peuvent plus du tout servir.

Le résultat expérimental le plus important, celui qui conduit à la critique fondamentale de nos notions classiques fut la découverte du fait que la vitesse de la lumière dans le vide représente la limite supérieure de toutes les vitesses physiques possibles.

Cette conclusion importante et inattendue résulte principalement des expériences du physicien américain MICHELSON ; à la fin du *XIX^e* siècle, ce savant voulut étudier l'effet du mouvement de la Terre sur la vitesse de propagation de la lumière ; à sa grande surprise, et à celle du monde scientifique tout entier, il découvrit que cet effet était nul, et que la vitesse de la lumière dans le vide est toujours exactement la même, indépendamment du système de référence utilisé pour la mesurer ou du mouvement de la source qui l'émet. Il va de soi qu'un tel résultat est tout à fait extraordinaire et contredit notre conception la plus fondamentale du mouvement. Car si un objet se meut rapidement à travers l'espace et que vous alliez à sa rencontre, celui-ci vous frappera avec une plus grande vitesse relative ; cette vitesse sera la somme de la vitesse de l'objet et de la votre. Si au contraire vous vous en éloignez, il vous frappera avec une vitesse moindre égale à la différence entre ces deux vitesses. C'est ce que l'on appelle le théorème d'addition des vitesses, que l'on a toujours tenu pour évident. Toutefois, les expériences les plus poussées ont montré qu'il n'est plus vrai dans le cas de la lumière ; la vitesse demeure toujours la même, de l'ordre de 300 000 kilomètres par seconde, nous la désignerons par c , si rapide que soit le mouvement de l'observateur. "Très bien" me direz-vous, "mais n'est-il pas possible de construire une vitesse super lumineuse en ajoutant plusieurs vitesses plus petites et donc physiquement réalisables ?" Par exemple on pourrait imaginer un train très rapide, animé si vous le voulez d'une vitesse égale aux trois quarts de celle de la lumière, et un vagabond qui courrait sur le toit des wagons avec une vitesse aussi égale aux trois quarts de celle de la lumière. D'après le théorème d'addition, la vitesse totale serait une fois et demie celle de la lumière et le coureur arriverait à dépasser le faisceau lumineux d'un signal posé le long de la voie. Cependant, la constance de la vitesse de la lumière est un fait expérimental ; la vérité est donc que, dans notre cas, la vitesse résultante ne peut dépasser la valeur critique c , et ainsi arrivons-nous à la conclusion que le théorème d'addition classique doit être faux, même pour des vitesses petites. La théorie complète dans laquelle je n'entrerai pas ici, mène à une formule nouvelle très simple pour le calcul de la vitesse résultante de deux mouvements superposés. Si v_1 et v_2 sont les deux vitesses à ajouter, la vitesse résultante v se trouve être telle que

$$\beta = (\beta_1 \pm \beta_2) / (1 \pm \beta_1 \beta_2) \quad \text{avec } \beta = v/c \text{ et } \beta_{1,2} = v_{1,2}/c \quad (1)$$

Je laisse vérifier aux plus perspicaces d'entre vous qu'une telle formule règle tous les problèmes, y compris lorsqu'un des deux mobiles est la lumière elle-même. Peut-être trouverez-vous intéressant de savoir que cette formule est en accord avec toutes les expériences que l'on a pu mener jusqu'à présent dans ce domaine.

Une fois admise l'existence d'une vitesse limite supérieure, nous pouvons aborder la critique des idées classiques de temps et d'espace en portant nos premiers coups à la notion de simultanéité qui en découle. Quand vous dites "*L'explosion des mines du Cap a eu lieu au moment même où je prenais mes œufs au jambon dans mon appartement à Londres*", vous pensez savoir ce que vous voulez dire. Mais je vais vous montrer que ce n'est pas vrai et qu'en toute rigueur votre affirmation n'a aucun sens ! Car quelle méthode allez-vous employer pour vérifier que ces deux événements, survenus en des lieux différents, sont simultanés ou non ? Vous pourriez dire que les horloges marquaient la même heure aux deux endroits ; mais alors se pose la question de pouvoir régler des horloges éloignées afin qu'elles marquent simultanément la même heure. Cela est-il possible ?

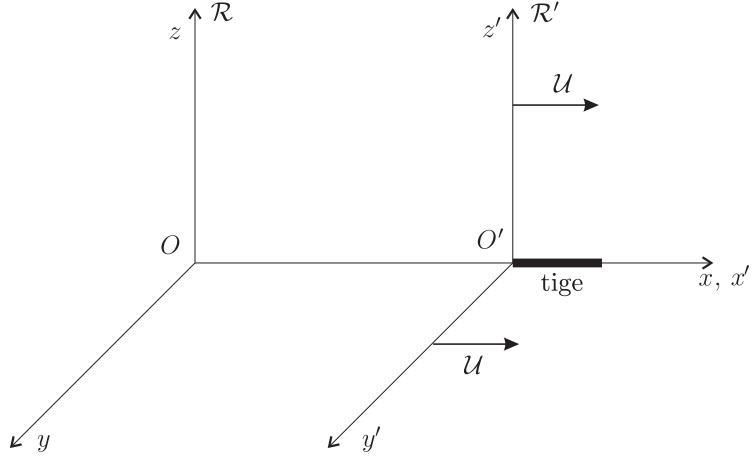
Considérons un signal lumineux émis à l'instant t_e^A par une station A en direction d'une station B immobile par rapport à A . Dès sa réception en B , à l'instant t_r^B , on le renvoie en A qui le reçoit à l'instant t_r^A . La moitié du temps qui s'écoule entre l'envoi du signal et son retour en A , multipliée par c sera définie comme la distance entre A et B . Les horloges des stations A et B sont dites être à la même heure si, au moment de l'arrivée du signal en B , l'horloge locale indique un temps égal à $(t_e^A + t_r^A) / 2$. Par des réglages successifs on arrive donc à synchroniser deux horloges immobiles l'une par rapport à l'autre. Mais ce résultat sera-t-il acceptable pour un observateur C en mouvement par rapport à ces deux stations ? Nombreuses sont les expériences de pensée ou effectivement réalisées qui prouvent que non. Ainsi la notion de simultanéité **absolue** s'évanouit : *deux événements qui ont lieu dans des endroits différents peuvent être considérés comme simultanés par rapport à un système de référence, et être séparés par un intervalle de temps par rapport à un autre système pour peu que ce dernier soit en mouvement par rapport au premier.* Cette proposition semble au premier abord tout à fait extraordinaire mais trouvez-vous extraordinaire de dire qu'en dnant dans un train vous mangez votre soupe et votre dessert au même point du wagon restaurant, mais en deux points très éloignés sur le trajet du train ? Et pourtant on peut dire à ce propos que *deux événements qui ont lieu en des temps différents en un même point d'un système de référence peuvent être séparés par un intervalle d'espace non nul par rapport à un autre système pour peu que ce dernier soit en mouvement par rapport au premier.* En comparant cette dernière phrase triviale et la première "paradoxe", vous verrez qu'elles sont absolument symétriques et que l'on peut passer de l'une à l'autre en intervertissant simplement les mots temps et espace.

Tout déplacement relatif s'effectue à la fois dans l'espace et dans le temps et donc dans ce qu'il est convenu d'appeler l'espace-temps. Les deux mouvements extrêmes sont l'immobilité qui est un déplacement purement temporel, et le déplacement de la lumière dans le vide qui est donc un déplacement purement spatial. Dans le cas de l'immobilité il n'y a pas de déplacement spatial, pour la lumière il n'y a donc plus d'écoulement du temps. Au gré de sa vitesse, on transforme donc des intervalles d'espace en intervalle de temps. Dans le cadre de notre expérience ordinaire, et compte tenu de la faiblesse des vitesses que nous pouvons atteindre par rapport à celle de la lumière, cette transformation conduit à des résultats pratiquement inobservables, ce qui semble appuyer l'idée classique que le temps est absolu et immuable comme le pensait NEWTON. Mais force est de constater que la réalité physique apparaît tout autre !

Comme j'ai essayé de vous l'expliquer, la critique des notions d'espace et de temps conduit à la conclusion que les intervalles d'espace peuvent être partiellement convertis en intervalles de temps et réciproquement : ce qui veut dire que la valeur numérique d'une distance donnée ou d'une période de temps donnée sera différente selon les différents systèmes en mouvements à partir desquels on les mesure. La théorie permet même de quantifier exactement ces différences.

Considérons deux systèmes de référence $\mathcal{R} = (O, x, y, z, ct)$ et $\mathcal{R}' = (O', x', y', z', ct')$, qui se superposent à $t = 0$ et qui sont tels que la **vitesse de O' dans \mathcal{R} est constante** et égale à $\mathcal{U} \vec{e}_x$.

Sur un graphique, voici ce que l'on pourrait imaginer



La longueur $\ell' = x'_2 - x'_1$ d'une tige disposée selon la direction Ox' dans \mathcal{R}' et immobile dans ce référentiel, se verra transformée en une longueur $\ell = x_2 - x_1 = \ell'/\gamma$ dans \mathcal{R} . L'analyse rapide du facteur

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{avec } \beta = \mathcal{U}/c \quad (2)$$

permet de voir immédiatement que $\ell < \ell'$. Un tel résultat est une conséquence directe des travaux du physicien hollandais LORENTZ qui expliqua à la fin du XIX^e siècle que la transformation "usuelle et évidente" dans ce contexte, introduite par GALILEE avant même les travaux de NEWTON

$$\begin{cases} x' = x - \mathcal{U}t \\ t' = t \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} y' = y \\ z' = z \end{cases} \quad (3)$$

devait, pour rétablir le véritable statut de l'espace et du temps révélé aux grandes vitesses, être remplacée par

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - \mathcal{U}t) \\ t' = \gamma(t - \mathcal{U}x/c^2) \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} y' = y \\ z' = z \end{cases} \quad (4)$$

Cette transformation porte le nom de son inventeur, LORENTZ.

La procédure d'une telle expérience est claire : Pour mesurer la longueur dans \mathcal{R}' , il convient de se déplacer avec la tige. Par contre, pour mesurer la longueur dans \mathcal{R} , la mesure de x_1 et x_2 devant se faire au même instant $t = t_1 = t_2$, il convient de disposer une règle en arrière plan et de prendre une photographie au moment où la tige passe devant les graduations.

En ce qui concerne le temps, comme nous l'avons expliqué de manière orale, c'est l'inverse ! Un observateur, lié au système de référence \mathcal{R}' par exemple par le fait que $x' = 0$, voit son temps t' relié au temps t d'un observateur au repos en x dans \mathcal{R} par la formule $t' = t/\gamma$, c'est tout aussi simple à vérifier d'un point de vue théorique. Et parfaitement en accord avec les expériences les plus récentes et les plus variées que l'on a pu mener dans ce domaine.

De même, l'utilisation de la transformation de LORENTZ permet de déterminer la nouvelle formule relativiste donnant l'expression d'une quantité physique dans le référentiel \mathcal{R}' en fonction de son expression dans \mathcal{R} et réciproquement. Afin que vous puissiez occuper vos longues soirées d'hiver, je mentionne le résultat de la transformation de la vitesse d'un mobile $\vec{v} = v \vec{e}_x$ dans \mathcal{R} qui devient

$\vec{v}' = v' \vec{e}_x$ dans \mathcal{R}' avec

$$v' = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx'}{dt} \frac{dt}{dt'} = \frac{v - \mathcal{U}}{1 - \frac{\mathcal{U}v}{c^2}} \quad (5)$$

Je laisse le soin à tout un chacun de vérifier tout ceci...

Une autre conséquence importante de l'existence de la vitesse possible maximum a trait la masse des corps en mouvement. D'après les définitions générales de la mécanique, la masse d'un corps détermine la difficulté que l'on éprouve le mettre en mouvement, ou accélérer son mouvement s'il en a un ; plus la masse est grande, plus il est difficile d'augmenter la vitesse d'une quantité donnée.

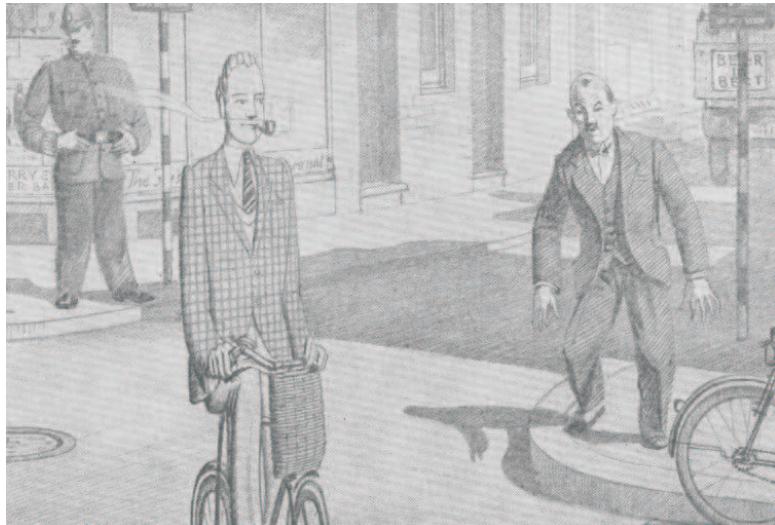
Le fait qu'aucun corps en aucune circonstance ne peut acquérir une vitesse supérieure celle de la lumière conduit directement la conclusion que sa résistance une nouvelle accélération ou, en d'autres termes, sa masse, doit croître de façon illimitée quand sa vitesse tend vers celle de la lumière. Un certain nombre de considérations dynamiques généralisant l'introduction cinématique proposée par LORENTZ conduisent une formule analogue aux relations de transformation des intervalles de temps et d'espace. Si m_o est la masse d'un corps au repos, elle deviendra $m = \gamma m_o$ lorsque le corps sera animé d'une vitesse uniforme \mathcal{U} . Un certain nombre d'expériences permettent d'observer facilement cet effet de changement relatif de masse sur des particules très rapides. Par exemple, la masse des électrons émis (avec des vitesses égales $0,99 c$) par des corps radioactifs est plusieurs fois plus grande que cette masse au repos ; et les électrons qui existent dans ce que l'on appelle les rayons cosmiques et qui se meuvent des vitesses de l'ordre de $0,9998 c$, ont des masses 1000 fois plus grandes. Avec de telles vitesses la mécanique classique devient absolument inapplicable et nous entrons dans le domaine de la pure théorie de la relativité.

À ces mots M. TOMPKINS fut abasourdi. Il commençait à prendre conscience de l'ampleur de la révolution scientifique qui avait dû se dérouler en ce début de XX^e siècle. Son esprit vacilla... Il entra dans un songe profond...

Quand il rouvrit les yeux, il se trouvait debout au coin d'une rue dans une belle ville ancienne. Les aiguilles de la grosse horloge marquaient presque midi et les rues étaient à peu près vides. Un unique cycliste roulait lentement et, à son approche, les yeux de M. TOMPKINS s'écarquillèrent d'étonnement. La bicyclette et le jeune homme qui la montait étaient incroyablement aplatis dans la direction de leur mouvement, comme s'ils étaient vus à travers une lentille cylindrique.

L'horloge de la tour sonna midi, et le cycliste, visiblement pressé, pédala plus fort. Il ne semblait pas à M. TOMPKINS qu'il allât plus vite, mais le résultat de ses efforts fut qu'il s'aplatit davantage et, en s'éloignant, il avait exactement l'air d'une image découpée dans du carton. M. TOMPKINS se sentit tout d'un coup très fier de comprendre ce qui arrivait au cycliste : "*il semble évident qu'ici la vitesse limite de la nature est très basse...*" Effectivement, un taxi qui roulait alors dans la rue en faisant tout le bruit possible, ne s'en tirait pas mieux que le cycliste et se transait péniblement. M.

TOMPKINS décida de rattraper le cycliste pour savoir de quoi il en retournait.



Il emprunta un vélo abandonné contre un mur et s'élança dans la rue. Il comptait se trouver immédiatement aplati et s'en réjouissait car son embonpoint croissant l'inquiétait depuis quelque temps. Mais à sa grande surprise, rien n'arriva, ni à lui, ni à son vélo. Par contre l'aspect du paysage changea complètement. Les rues devinrent plus courtes, les devantures des boutiques se mirent à ressembler à des fentes étroites, et les quelques passants prirent un aspect filiforme. "Bon sang, mais c'est bien sr" se dit M. TOMPKINS, "c'est de là que vient le mot relativité ..." Il était bon cycliste et faisait de son mieux pour rattraper le jeune homme mais il découvrit qu'il n'était pas facile du tout de prendre de la vitesse sur ce vélo. Il avait beau peser le plus possible sur les pédales, l'augmentation de vitesse était ridicule ... Il finit tout de même par atteindre son objectif et, alors qu'il roulait à côté de son futur interlocuteur il remarqua que celui-ci n'était plus aplati et avait un aspect tout à fait normal. "Excusez moi Monsieur" dit-il "ne trouvez-vous pas mal commode de vivre dans une ville soumise à une limite de vitesse aussi basse ?" "Quelle limite de vitesse ?" répliqua l'autre avec surprise "nous n'avons aucune limite de vitesse ici, je peux aller partout aussi vite que je veux, ou du moins je le pourrais si j'avais une moto au lieu de ce vieux vélo bon à rien !" "Mais vous alliez très lentement quand vous m'avez dépassé tout à l'heure" dit M. TOMPKINS "Je vous ai particulièrement remarqué" "Ah, vous avez remarqué" dit le jeune homme visiblement offensé "Je suppose que vous n'avez pas remarqué que nous avons passé cinq pâtés de maison depuis que nous discutons, n'est-ce pas assez rapide pour vous ?" "Mais les rues rétrécissent tellement" suggéra M. TOMPKINS. "Quelle différence cela peut-il faire que nous allions plus vite ou que les rues deviennent plus courtes ? J'ai à parcourir la longueur de dix pâtés de maisons pour me rendre à la poste, et si je pédale plus fort les immeubles raccourciront et j'arriverai plus vite ! Voil nous y sommes" dit le jeune homme en descendant de son vélo.

M. TOMPKINS regarda l'horloge de la poste qui marquait midi et demi. "Eh bien" remarqua-t-il d'un air triomphant "cela vous a tout de même pris une demi-heure, quand je vous ai aperçu il était exactement midi." "Et vous avez senti passer cette demi-heure ?" demanda son compagnon. M. TOMPKINS dut convenir qu'elle lui avait semblé ne durer que quelques minutes. De plus, en regardant sa montre il vit qu'elle ne marquait que midi cinq. "Oh" dit-il "l'horloge de la poste avance" "Bien sr, ou bien votre montre tarde précisément parce que vous marchez trop vite. Mais qu'est-ce qui vous arrive ? Vous tombez de la lune ?" et le jeune homme entra dans la poste.

Alors M. TOMPKINS se rendit compte qu'il était malheureux de ne pas avoir à ses côtés le professeur conférencier qui lui aurait tout expliqué de ces phénomènes extraordinaires. Le jeune homme était

évidement un natif de ce pays et il était donc familiarisé avec cet état de choses avant même d'avoir appris à marcher. M. TOMPKINS fut donc obligé d'explorer tout seul ce monde étrange. Il mit sa montre à l'heure de la poste et attendit dix minutes pour s'assurer qu'elles fonctionnaient bien toutes les deux. Tout allait bien. Poursuivant son voyage le long de la rue, il finit par tomber sur la gare et vérifia de nouveau sa montre. A sa grande surprise elle retardait de nouveau un peu. *"Bon, cela doit être encore quelque effet de la relativité"* conclut M. TOMPKINS, et il se décida à interroger quelqu'un de plus intelligent que le jeune cycliste.

Il en eut bientôt l'occasion. Un homme d'une quarantaine d'années descendit du train et se dirigea vers la sortie. Une très vieille dame vint à sa rencontre, et, au grand étonnement de M. TOMPKINS, l'appela *"cher Grand-père"*. C'en était trop, sous prétexte d'aider à porter les bagages il engagea la conversation. *"Excusez-moi d'intervenir dans vos affaires de famille mais vous êtes vraiment le Grand-père de cette charmante vieille dame ? Vous savez je ne suis pas d'ici et jamais ..."* *"Parfaitement"* dit l'homme souriant dans sa moustache *"Je suis représentant, je passe ma vie dans les trains et je suis si heureux d'être revenu à temps pour voir ma petite fille encore en vie ! Mais excusez moi s'il vous plaît, il faut que je l'aide à monter dans le taxi ..."* et il s'éloigna rapidement laissant encore M. TOMPKINS seul avec ses problèmes.

Quelques sandwiches pris au buffet de la gare raffermirent ses facultés mentales. Il se mit alors à réfléchir : Admettons ; le fait de voyager et donc d'avoir une vitesse relative par rapport à un individu fixe modifie l'écoulement de son temps propre. Mais ceci est relatif, on pourrait tout à fait considérer que c'est le représentant qui est fixe dans son train et que c'est sa petite fille qui se déplace par rapport à lui, c'est d'ailleurs l'impression que l'on a lorsque l'on est dans un train... Tout ceci semble parfaitement symétrique, pourquoi est-ce la petite fille qui vieillit plus vite que son grand-père ?

N'y tenant plus il décida d'interroger un spécialiste : le contrôleur qui se trouvait sur le quai de la gare lui parut être à la hauteur de la situation, lui aussi il passait son temps dans les trains, il devrait bien être capable de lui expliquer tout cela. Après que M. TOMPKINS lui eut soumis son problème, le contrôleur LANGEVIN, c'était le nom qu'il avait pu lire sur sa casquette, se mit à rire. *"Monsieur vous êtes perspicace"* lui rétorqua-t-il *"Mais vous oubliez que pour que les voyageurs puissent monter dans le train et en descendre, il faut que celui-ci soit à l'arrêt. Pour atteindre la phase symétrique à laquelle vous faîte allusion il faut donc passer par des phases d'accélération, là se trouve la clef de votre énigme..."*.

Monsieur TOMPKINS fut tellement impressionné par cette réponse lumineuse qu'il se réveilla ! La conférence était terminée, il se retrouvait presque tout seul dans l'amphithéâtre !