



HAL
open science

Sur la " vitesse " de la lumière et sa mesure : disparition des étalons d'espace et de temps ; l'étalon de mouvement

Bernard Guy

► To cite this version:

Bernard Guy. Sur la " vitesse " de la lumière et sa mesure : disparition des étalons d'espace et de temps ; l'étalon de mouvement. 2013. hal-00814874

HAL Id: hal-00814874

<https://hal.science/hal-00814874>

Preprint submitted on 17 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Sur la « vitesse » de la lumière et sa mesure : disparition des étalons d'espace et de temps ; l'étalon de mouvement

Bernard GUY

Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Etienne

guy@emse.fr

1^o version
Avril 2013

Résumé

La vitesse de la lumière dans le vide n'est plus aujourd'hui une vitesse au sens où l'on disposerait déjà d'étalons d'espace et de temps indépendants d'elle, qui permettraient d'en faire la mesure. C'est au contraire la propagation de la lumière qui fournit de nos jours les étalons d'espace et de temps (qui reviennent au même étalon via le postulat $c = c_{ste}$). Par rapport aux pratiques plus anciennes, il y a ainsi un double changement : 1) changement d'ordre de priorité : la propagation de la lumière « précède » les étalons d'espace et de temps ; 2) changement du nombre d'étalons : on passe de deux étalons (espace et temps) à un seul. Il y a continuité entre ces pratiques. Pour le montrer, on fait correspondre au mètre et à la seconde dans leur définition ancienne des portions de mouvement de la lumière, évaluant ainsi deux grandeurs de natures a priori différentes par la même jauge. La « vitesse » de la lumière a alors deux valeurs : 299 792 458 m/s exprimant le ratio (figé par décret) entre les deux anciens étalons, comme deux « objets » particuliers de notre monde et désignés comme tels ; et $c = 1$, exprimant aujourd'hui qu'elle n'a pas de nombre, c'est elle qui permet de mesurer. Parler de la « constance de la vitesse de la lumière » c'est exprimer une tautologie, mais pouvoir « constater » cette dernière nous rassure quant au savoir-faire remarquable des physiciens, et à l'efficacité du bouclage entre les pratiques et les choix d'écriture des équations. Ces points de vue se raccordent avec ceux de l'auteur sur l'identité de substance entre espace et temps. On peut pour cette substance utiliser indifféremment le vocabulaire et les unités du temps ou de l'espace : une portion de mouvement relie de façon indissociable un aspect temporel (le procès du mouvement) et un aspect spatial (l'amplitude du mouvement). Dans ce contexte, il est plus approprié de dire qu'*il n'y a plus d'étalons d'espace ni de temps* et que *la seconde est l'étalon de mouvement*. Et de dire qu'une vitesse est le ratio d'un mouvement à l'étalon de mouvement (nous montrons alors la continuité entre les définitions anciennes et nouvelles de la vitesse).

Mots clés : espace ; temps ; mouvement ; vitesse ; lumière ; vitesse de la lumière ; théorie de la relativité ; constance de la vitesse de la lumière ; récursivité ; étalons ; étalon de vitesse ; étalon de mouvement ; mètre étalon ; seconde étalon ; mouvement de référence ; la seconde est l'étalon de mouvement

Introduction

Les lignes qui suivent présentent notre point de vue sur la « vitesse » de la lumière et sa mesure. Elles sont une autre façon de parler de nos recherches sur les concepts d'espace, temps et mouvement. Nous résumerons ces dernières en disant : il n'y a pas d'intervalle d'espace Δx sans intervalle de temps Δt , et réciproquement. Et, plutôt que de s'appuyer sur deux catégories conceptuelles distinctes d'espace et de temps pour décrire le monde, on peut s'appuyer sur la seule catégorie de « mouvement » (reliant temps et espace).

Par rapport à ce qu'il était il y a un siècle et plus, le point de vue sur la vitesse de la lumière a changé. Historiquement, elle a d'abord été considérée comme seconde par rapport aux définitions des étalons d'espace et de temps, proposés avant elle et indépendamment (on trouvera dans le Tableau 1 quelques étapes dans la définition des étalons d'espace et de temps). La caractérisation de la vitesse résultait de mesures, et la valeur obtenue était dépendante des étalons. La situation a changé aujourd'hui puisque la « vitesse » de la lumière est définie par décret, non par mesure et sans incertitude¹ ; le phénomène de propagation de la lumière est vu comme premier par rapport aux étalons d'espace et de temps qu'il définit (on peut dire que ces deux étalons reviennent à un seul et même étalon, via le facteur constant de la vitesse de la lumière).

La question qui se pose alors est de déchiffrer ces deux changements de perspective associés :
- comment comprendre le changement d'ordre de préséance entre les étalons d'espace et de temps d'une part (ils étaient premiers) et l'étalon que nous pourrions simplement appeler la lumière² d'autre part (c'est elle qui est première maintenant) ; - et comment passer de deux étalons à un seul ? Y-a-t-il continuité ou rupture entre ces deux situations *du point de vue de la mise en œuvre concrète des mesures* d'espace et de temps, et de la définition de la vitesse de la lumière ? Comment parler de tout cela ? En particulier, quel sens donner à un étalon de mouvement ? Et comment peut-on dire que les étalons d'espace et de temps en sont dérivés ?

Dans le présent texte, nous voulons montrer qu'il y a bien continuité entre les deux situations et que les mesures que l'on peut faire s'appuient aujourd'hui effectivement sur des concepts

¹ ce qui ne lui empêche pas d'avoir un sens discuté dans la suite du texte.

² on peut parler aussi d'étalon de mouvement ou de vitesse (voir la suite du texte).

d'espace et de temps reliés et renvoyant à une seule et même « substance », ce qui pouvait paraître a priori paradoxal.

Dans cette première version du présent texte, il n'est pas donné de liste de références. On trouvera dans les travaux de l'auteur déposés sur les archives ouvertes HAL et Internet Archive les développements utiles pour introduire à la compréhension de notre point de vue. La démarche conceptuelle d'ensemble est exposée dans l'article *Penser ensemble le temps et l'espace* (Philosophia Scientiae, 15, 3, 91-113, 2011). Nous prenons le parti de ne pas rediscuter les problèmes conceptuels qui ne manquent de se cacher derrière les points de vue adoptés, en vue de montrer avec quelque détail qu'ils n'empêchent pas une mise en œuvre pratique des mesures de la physique. Ce sont ces mesures qu'il faut remonter, et resituer dans un nouveau cadre³.

1. Vitesse de la lumière : des anciens étalons de longueur et temps aux nouveaux

Commençons par discuter la question de la vitesse de la lumière en nous rapportant aux anciens étalons d'espace et de temps ; ce sont eux qui correspondent le mieux à notre première expérience de l'espace (un corps solide, une règle graduée) et du temps (un mouvement : le battement d'un pendule ; la rotation de la terre...). En changeant notre compréhension du rôle de la lumière et son mouvement, nous changerons notre point de vue sur ces étalons.

Les anciens étalons d'espace et de temps se rapportaient à des échelles de temps et d'espace « humaines » : la seconde renvoie au rythme cardiaque et le mètre à la longueur d'une enjambée. Plus officiellement, on se rapportait pour le temps à la période d'un pendule de longueur adéquate, ou encore à une fraction du mouvement diurne de rotation de la terre sur elle-même (ou à sa révolution annuelle autour du soleil), et pour l'espace à une règle étalon déposée dans le Pavillon des poids et mesures à Breteuil (tous deux en correspondance implicite avec ces échelles humaines), Tableau 1.

³ on peut dire inversement que ce ne sont pas des considérations théoriques a priori mais des considérations pratiques qui nous demandent ici de réviser nos concepts de temps, espace et mouvement. Les difficultés conceptuelles seront évoquées ; elles conduisent à des boucles d'autoréférence qui, précisément, doivent être stabilisées par une « pratique » : la voici donc.

Dans ces conditions la vitesse de la lumière résultait de deux mesures, permettant de calculer un ratio $\Delta x / \Delta t$. Mais la vitesse de la lumière n'est plus aujourd'hui une vitesse au sens où l'on disposerait déjà d'étalons d'espace et de temps indépendants pour la caractériser. On a en effet choisi depuis lors de donner au phénomène de propagation de la lumière, élu et désigné parmi les phénomènes, un rôle particulier.

Il faut donc passer d'une définition de la vitesse de la lumière comprise comme si des étalons d'espace et de temps préexistaient, à une définition où la lumière elle-même relie temps et espace. Pour ce faire, nous proposons de reprendre la compréhension de l'ancienne « vitesse » et faire le lien avec le nouveau point de vue et les nouvelles pratiques.

C'est ce qui est exprimé dans la Figure 1. Dans la situation ancienne, on avait deux grandeurs distinctes, considérées comme mesurées chacune par des procédures différentes, avec des unités différentes, une longueur Δx et un temps Δt (à partir desquelles on pouvait calculer un ratio $\Delta x / \Delta t$). La longueur n'avait rien à voir avec aucun temps (fût-elle de plusieurs millions d'années lumière !⁴), et le temps n'avait rien à voir avec aucune amplitude d'espace (associé pourtant qu'il était à un objet du monde, une « horloge », d'étendue non nulle). Dans la nouvelle compréhension, chacune de ces deux (anciennes) grandeurs doit pouvoir se mesurer par la même et unique procédure, s'exprimer dans la même dimension ou même unité, et conduire à la définition des nouveaux étalons. On voit sur la figure que l'on fait correspondre à l'intervalle Δx ⁵ une portion de mouvement de la lumière caractérisée par sa longueur ou son temps $l_1 = t_1$ (avec $c = 1$) ; le mot portion de lumière correspond indifféremment à une longueur ou un temps, les deux sont maintenant associés et correspondent à la même unité (on peut exprimer les mesures de longueurs et de temps indifféremment en mètres ou en secondes). On voit de même que l'on fait correspondre à l'intervalle de temps Δt , une portion de mouvement de la lumière caractérisée par $l_2 = t_2$, et l'on peut utiliser la (les) même(s) unité(s) que pour l'intervalle Δx . Lorsque le phénomène définissant Δt se déploie de A à B, le photon va de A' à B', et parcourt une distance ou temps égal à t_2 . Nous supposons que nous savons faire la correspondance entre les points B et B', ce qui ne peut se faire « dans

⁴ on ne peut s'empêcher de faire apparaître un temps dans les mots utilisés !

⁵ on part ici d'une longueur comprise de façon distincte d'une durée (et inversement), alors que l'on a proclamé leur identité de substance. Sans reprendre la discussion de fond et les problèmes de récursivité liés, nous dirons à nouveau simplement qu'il faut partir par un bout ; et, précisément, la mise en œuvre pratique montrera que l'on peut tout comprendre dans la même perspective : une longueur comme mouvement arrêté (c'est d'ailleurs conforme à la nouvelle définition du mètre) et le temps comme mouvement continué. Ce que nous disons ici des portions de mouvement de la lumière associant espace et temps s'inscrit dans la même problématique.

l'instant » et suppose des hypothèses de « constance », qui se ramènent à $c = \text{cste}$; le caractère « constant » de la « vitesse » de la lumière contribue à la cohérence de tout l'édifice (section 4). Pour la clarté de l'illustration, nous avons envisagé un parcours rectiligne A'B' pour le photon, mais d'autres parcours peuvent être envisagés, l'important étant que l'on mette désormais en relation une distance parcourue avec un temps.

La vitesse de la lumière est alors le ratio entre la distance (ou le temps ou la portion de mouvement) parcouru(e) en une seconde soit t_2 , et la valeur du mètre exprimé dans la même unité que cette distance, soit t_1 ; on obtient: $c = t_2 / t_1$. Il y a donc continuité entre les deux mises en œuvre pratiques (les deux désignations) de la vitesse de la lumière, dans le passage d'un ratio espace / temps à un ratio de deux portions de mouvement de la lumière. Mais dans le second ratio t_2 / t_1 , la vitesse de la lumière n'est plus une vitesse dans son sens premier se rapportant à une distance divisée par un temps ; c'est devenu un nombre sans dimension, c'est un scalaire, c'est un simple facteur de conversion « figé » par rapport au mètre et à la seconde dans leurs définitions anciennes et « humaines », et initialement comprises indépendamment l'une de l'autre. En d'autres termes, la vitesse de la lumière est la comparaison entre le mètre et la seconde (comme objets préexistants) de son point de vue de lumière ; le paradoxe pouvait être qu'un seul et même phénomène, un seul étalon (la lumière) jauge deux quantités supposées de natures a priori différentes. On a tout exprimé en portions de mouvement de la lumière (la définition de la vitesse est adaptée, cela reste opérationnel) mais/et par là changé la définition des étalons d'espace et de temps (voir section 2).

On peut alors donner à la vitesse de la lumière *deux valeurs suivant les deux points de vue* : 1) $c = 299\,792\,458$ m/s, c'est un simple ratio de conversion entre deux objets de notre monde. 2) Ou plus simplement aujourd'hui $c = 1$ (sans incertitude), ce que l'on fait fréquemment dans les ouvrages de physique, exprimant que c'est elle l'unité, c'est elle qui jauge les autres, elle n'a plus de nombre (quelle est la valeur du mètre en mètres ?). Cela correspond à l'égalité $t_2 = t_1$ dans le ratio ci-dessus.

2. Les étalons de longueur et de temps aujourd'hui

Ceci nous conduit naturellement à la définition des nouveaux « étalons » d'espace et de temps par la propagation de la lumière, dans une procédure semblable à celle mise en œuvre dans la Figure 1.

La définition de la seconde comme 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux de l'état fondamental de l'atome de Césium 133 exprime « simplement » qu'on peut subdiviser cette dernière de façon extrêmement fine, comme on le ferait en inscrivant des graduations sur un règle graduée, mais renvoie fondamentalement à une portion de trajet de la lumière. La période de cette lumière ne peut être séparée de sa longueur d'onde moyennant le facteur constant de la « vitesse » de la lumière. Quand on utilise le mot seconde, on se rapporte à l'étalon ancien ; mais les subdivisions temporelles associées à l'onde lumineuse émise par le Césium s'appliquent aussi bien maintenant à la portion d'espace mise en correspondance.

La définition du mètre comme le trajet effectué par la lumière en un temps de $1 / 299\,792\,458$ seconde exprime à nouveau que l'on se rapporte à une portion de trajet de la lumière. La définition immédiatement antérieure (dont nous n'avons pas parlé, cf. Tableau 1), à partir d'une longueur d'onde émise par l'isotope 86 du Krypton, montrait de façon plus directe (et équivalente) l'identité, à un facteur près, avec celle de la seconde. On pourrait tout à fait définir le mètre par la même transition de l'atome de Césium que pour la seconde, soulignant que c'est désormais le même étalon.

La nouvelle définition du mètre met explicitement en évidence le temps associé à une longueur (on ne contemple pas l'étalon de longueur « dans l'instant »)⁶. La nouvelle définition de la seconde révèle d'une nouvelle façon le lien « générique » du temps avec l'espace via un mouvement, c'est ici le même que pour le mètre⁷

⁶ cette définition ne fait pas problème y compris dans sa mise en œuvre, et l'on n'éprouve pas le besoin de fabriquer un étalon de marbre à partir d'elle ; l'association temps-espace qu'elle manifeste nous est « déjà » intimement familière ?

⁷ on associe un intervalle d'espace à un intervalle de temps jusque dans la modélisation de l'atome de Césium par l'équation de Schrödinger, équation aux dérivées partielles reliant les deux variables espace et temps, et permettant de prédire la transition électronique utile pour définir la seconde.

Ces deux nouvelles définitions manifestent la relation de proportionnalité entre les « étalons » d'espace et de temps dans le mouvement de la lumière. Ils révèlent un changement de point de vue sur les concepts d'espace et de temps qui n'est peut-être pas suffisamment apprécié et mérite d'être explicité. Nous le faisons dans la section suivante.

3. Quel sens donner à un étalon de mouvement ou étalon de vitesse ?

En donnant un caractère primaire au mouvement par rapport à l'espace et au temps, nous avons modifié le sens que l'on donne à ces derniers. Espace et temps sont désormais « engendrés » par le mouvement, et comme deux visages de la même substance. Faire une mesure d'espace ne se conçoit plus désormais en regardant « dans l'instant » quelles graduations d'une règle se trouvent en face des deux extrémités de la longueur à mesurer ; on ne peut dissocier cette longueur du parcours d'un signal d'une extrémité à l'autre, associée à une propagation et au temps qui la permet. Réciproquement, un temps n'est pas pensé comme un pur flux envisageable sans prendre de « place » dans l'espace ; il est associé à une longueur. On ne peut plus nier qu'une horloge a un encombrement non nul et repose in fine sur le déploiement d'un mouvement dans l'espace. Le temps est associé à une amplitude d'espace, l'espace à un temps de parcours⁸. Ainsi dans la Figure 1, en nous permettant de tout jauger à l'aune de la lumière, nous nous sommes appuyés sur (ou nous avons induit) un changement implicite du sens des mots « mesure de distance » et « mesure de temps ». Celles-ci ne sont plus comprises comme pouvant relever que d'une seule catégorie conceptuelle, espace ou temps, séparément.

Parler d'étalon de mouvement ou d'étalon de vitesse, c'est exprimer que cet espace et ce temps « parcourus », et liés au mouvement, sont compris dans leur nouveau sens : leurs grandeurs sont liées dans un rapport constant par le phénomène choisi. Si le mot vitesse a un sens par rapport à des définitions préalables éventuelles de standards d'espace et de temps, et s'il en a aussi pour des mobiles dont le mouvement est comparé à celui de l'étalon (voir section 4), il n'en a plus pour l'étalon de mouvement lui-même. Un étalon de lumière est une façon de relier des portions d'espace et de temps. Cet étalon est montré (comme on montrait

⁸ Cela entraîne un minimum de délocalisation du temps et de désynchronisation de l'espace sur lesquels nous ne nous arrêtons pas ici.

le mètre étalon). *En montrant la lumière, on montre la mobilité unité*⁹. Nous ne reparlons pas des problèmes de récursivité qui se posent, longuement analysés par ailleurs : - l'espace et le temps sont-ils définis avant ou après le mouvement ? - peut-on donner un sens « ultime » à l'espace et au temps ? Nous nous arrêtons pour eux à une définition pratique, dans l'opposition / composition de relations temporelles et de relations spatiales, portant sur les mêmes objets du monde ; cela fait apparaître des caractères d'arbitraire et de « provisoire », et ne fait pas l'économie d'incertitudes ou « mal-certitudes ».

Par commodité, nous avons encore parlé d'étalons d'espace et de temps, comme dérivés de la lumière. Nous pouvons comprendre cela dans la mesure où nous avons pu exprimer les anciens étalons par une procédure nouvelle mettant en jeu le mouvement de la lumière, comme dans la Figure 1. Mais *il est plus juste de dire qu'il n'y a plus d'étalons d'espace et de temps*. Il n'y a que la lumière-étalon et son mouvement, et l'on met en correspondance des portions de trajet de cette lumière avec des « distances » et des « durées ». On soulignera toutefois que, dans le cadre d'une pensée de la relation, on ne fait que comparer des phénomènes à d'autres phénomènes, et le mètre et la seconde « humains » ne disparaissent pas : ils sont là pour nous rappeler cette double nature de l'étalon dans le cadre d'une telle pensée de la relation ; cette double nature est reflétée dans la double valeur attribuée à la vitesse de la lumière. L'étalon-lumière est à la fois défini par comparaison (cf. la première valeur de la vitesse de la lumière en mètres par secondes) et défini absolument, et la valeur absolue attribuée en tant qu'étalon est indépendante de toutes les comparaisons ($c = 1 = \text{cste}$).

En résumé de cette section, nous pouvons dire que, maintenant, *la seconde est l'étalon de mouvement*¹⁰. L'étalon de temps n'existe plus, celui d'espace non plus. Le nouvel étalon « regroupe » les anciens étalons de temps et d'espace. Pour entendre cela, le protocole expérimental sous-jacent, mettant en jeu la lumière et l'atome de Césium doit être précisé (on peut parler de seconde-lumière) ; le caractère secondaire de la notion de vitesse par rapport à la notion de mouvement doit aussi être rappelé (une vitesse est le ratio d'un mouvement à l'étalon de mouvement ; voir section suivante) ; la notion de mouvement doit être repensée et accompagnée d'une nouvelle compréhension de temps et espace eux-mêmes (nos travaux) ; on peut par extension pour la seconde parler d'étalon de vitesse. Toutes ces révisions sont explicitées à l'occasion du nouveau rôle donné à la lumière ; on aura compris toutefois que

⁹ la lumière incarne la mobilité.

¹⁰ on privilégie la seconde dans la mesure où le mètre est maintenant défini lui-même en secondes.

celle-ci aura servi de révélateur d'une compréhension plus profonde qui la déborde et concerne les concepts d'espace et temps ; elle était certes plus cachée dans les anciens étalons.

4. Vitesse d'un mobile

Dans le nouveau contexte, il faut changer la définition de la vitesse d'un mobile, tout en assurant la continuité avec les définitions passées (Fig. 2). Dans l'ancienne compréhension, la vitesse du mobile est le rapport d'un intervalle d'espace parcouru Δx à un intervalle de temps mis pour le parcourir Δt . Pour faire le lien avec la nouvelle compréhension, il faut exprimer l'un et l'autre par la seule lumière. Le Δx sera un temps ou longueur $t_2 = l_2$ ($c = 1$) parcourue par la lumière entre les deux extrémités du segment correspondant ; et le Δt sera le trajet mis en relation du photon de A' à B' lorsque le mobile parcourt le segment de A en B, soit $t_1 = l_1$. La vitesse cherchée est alors égale au ratio $t_2 / t_1 = l_2 / l_1$ où les deux termes du ratio sont exprimés dans les mêmes unités. Il y a continuité entre anciennes et nouvelles pratiques, comme dans la section 1. Nous avons là la définition d'une vitesse, dans un sens « second » (mais c'est maintenant le seul sens !) par rapport au sens tout particulier associé à la lumière. Appliquée à la lumière, cette procédure donne $t_2 = t_1$ et $c = 1$; c'est une autre façon de dire que la définition de la vitesse de n'importe quel mobile est un ratio à la « vitesse » de la lumière ; c'est-à-dire encore à une portion de trajet de la lumière mise en correspondance avec le sien.

5. Mesure et constance de la vitesse de la lumière

La constance de la vitesse de la lumière est conventionnelle, comme l'est tout choix d'unité supposée de valeur constante en physique (on le supposait du mètre étalon, on le suppose de la seconde, fût-elle définie par l'atome de Césium). Au départ, ce qui est conventionnel n'est pas tant de dire : $c = \text{cte}$, que de dire : nous choisissons de nous appuyer sur le phénomène de propagation de la lumière pour définir les unités d'espace et de temps et de tout boucler à partir de là (il y a récursivité). La « constance de la vitesse » de la lumière est une conséquence de ce choix « arbitraire »¹¹. Nous aurions pu faire d'autres choix, comme par le

¹¹ C'est-à-dire laissé au libre arbitre ; il n'est pas interdit de penser sa remise en cause dans le futur si des choix plus « commodes » se présentaient.

passé de nous appuyer sur le mouvement apparent du soleil, ou des étoiles, dans la rotation de la terre sur elle-même, et de tout boucler à partir de là. L'« obligation » de poser à un moment donné un postulat du type $c = c_{ste}$ se comprend dans le fonctionnement de la pensée de la relation, par opposition à une pensée substantielle. Derrière cette « constance », c'est-à-dire derrière le choix fait de ce qui sert de référence, se cachent l'identité de substance entre temps et espace, et aussi l'arrêt d'une régression à l'infini (dans un système relationnel, il faudrait tout comparer à tout...) dans la désignation d'une « pratique », avec ce que cela suppose d'« incertitude ». On peut, à propos de la constance de la vitesse de la lumière, parler de « postulat épistémologique ». On comprend ainsi les équations de la relativité ; c'est-à-dire, pour « boucler » entre les choix faits et les mesures, on est conduit à toute une série d'affirmations comme : la masse est une fonction de la vitesse $m(v)$, ou encore : il y a des variations des longueurs et des temps mesurés avec la vitesse etc. Tout repose sur un choix concernant la lumière qui est le plus commode que l'on puisse faire à l'heure actuelle.

Quand on mesure aujourd'hui une « vitesse de la lumière », on compare en réalité deux trajets de la lumière pour deux photons différents. On peut trouver une vitesse différente de « un » lorsque les trajets n'ont pas les mêmes propriétés, par exemple dans le vide et dans la matière. Si on procède dans des conditions identiques (précisément, pour la bonne cohérence, c'est ce que l'on s'efforce de faire, y compris pour ce qui sert à définir les standards) et que l'on trouve un ratio constant, cela signifie que l'on boucle bien, que l'on fait de bonnes mesures, que les mesures d'« espace » et « temps » que l'on fait sont cohérentes etc. Il faut très certainement saluer le savoir faire des physiciens qui permettent de faire fonctionner une telle « cohérence » ; par exemple la discussion récente sur le temps de parcours de neutrinos entre Genève et les Alpes italiennes, montre l'extrême précision du bouclage entre triangulation spatiale et mesures de « temps ». On peut considérer que la constatation de la *constance de la vitesse de la lumière exprime une tautologie extrêmement rassurante sur le remarquable savoir-faire, tant théorique qu'expérimental, des physiciens.*

La redondance est double : - celle qui consiste à se rapporter, pour parler de cette vitesse, à des étalons d'espace et de temps qui en sont dérivés ; - celle qui consiste à parler de constance de vitesse pour la lumière que l'on a choisie comme phénomène de référence. Si malgré les précautions prises dans les mesures, on observe des différences entre les trajets de deux photons, c'est qu'on n'a pas complètement compris les conditions dans lesquelles on s'est situé, et cela peut entraîner la nécessité de révisions intéressantes. Si l'on se rapporte, pour

donner un sens concret aux mesures, aux étalons d'espace et de temps dans leur sens ancien, et que l'on observe des différences par rapport à ce qui est attendu, on peut déclarer, dans une démarche rétrograde, que les phénomènes sur lesquels sont basés ces anciens étalons (la rotation de la terre etc.) montrent eux-mêmes une dérive par rapport au temps et à l'espace définis par la lumière et ses sources atomiques. Mais ce n'est pas pour autant qu'on doive donner raison aux étalons atomiques par rapport aux étalons astronomiques. Un problème de ce type se pose à propos de la nécessité ou non de mettre des secondes intercalaires dans les durées des années : il est intéressant de constater que la communauté scientifique hésite à briser le lien avec le temps des cycles astronomiques (régulant l'alternance des jours et des nuits et des saisons), même en utilisant le temps atomique. Cela manifeste à notre sens d'une façon détournée le degré d'arbitraire « initial » qui préside à ces choix d'étalons (la lumière / la rotation de la terre) et le rôle non éteint des « anciens » étalons humains¹².

Si en tout cas, pour « mesurer la vitesse » de la lumière on a besoin à quelque moment que ce soit de la lumière (de façon directe ou cachée, c'est-à-dire dans les étalons qui définissent espace et temps) il y a circularité (ou récursivité), pour ce qui est de la conclusion à une « constance », forcément acquise¹³.

La question se pose évidemment de comprendre les expériences de la physique où l'on a « mesuré » une constance de la vitesse de la lumière et, au premier rang d'entre elles, l'expérience interférométrique de Michelson et Morley. Cette dernière expérience n'est pas directement une mesure de la vitesse de la lumière, mais l'examen de sa possible variation. Lorsqu'on regarde le sujet de près, on trouve une grande variété d'interprétations de cette expérience ; cela mériterait un article spécial, tant la littérature est abondante. Certains auteurs critiquent à cette occasion la théorie de la relativité, et pour certains, la variété même d'interprétations possibles est une raison de cette critique. Pour nous, cette variété d'interprétations est le signe de la situation de choix possible devant laquelle nous sommes en physique, nous trouvant à l'intérieur du monde (dans une pensée relationnelle et non substantielle). Le choix $c = \text{cste}$ est le choix le plus « commode » et se relie au rôle pratique de la lumière ; il permet le bouclage entre équations et mises en œuvre des mesures et est en

¹² à comprendre, répétons-nous, dans une pensée relationnelle : on ne peut que comparer ces temps les uns aux autres et décider – arbitrairement- celui auquel on attribue un écoulement uniforme.

¹³ l'auteur est preneur d'une expérience de « mesure » de la vitesse de la lumière qui ne ferait aucunement appel à de la lumière (cela apparaît désormais un non-sens dans le cadre construit aujourd'hui).

continuité avec la démarche exposée ici (lien espace - temps), et avec la structure de l'édifice actuel de la physique¹⁴.

Remerciements

L'auteur remercie les participants, autant orateurs qu'auditeurs, à la journée intitulée : *L'espace et le temps entre les philosophes et les physiciens* (Ecole des mines, Saint-Etienne, 5 février 2013). Une question posée à cette occasion est au départ de ce texte. Il remercie aussi tous ceux avec qui il a discuté ces questions.

¹⁴ nous n'avons pas discuté les différentes façons de définir la vitesse de la lumière (vitesse de phase, de groupe, vitesse du front d'onde etc.). Ces différentes vitesses sont supposées égales dans le vide ; cette « vitesse » commune et constante apparaît comme un facteur structurant de la démarche physique, unifiant la mise en œuvre pratique des mesures et la compréhension théorique (en particulier la nôtre en ce qui concerne l'identité de substance de l'espace et du temps) ; elle permet un « arrêt » de régressions à l'infini.

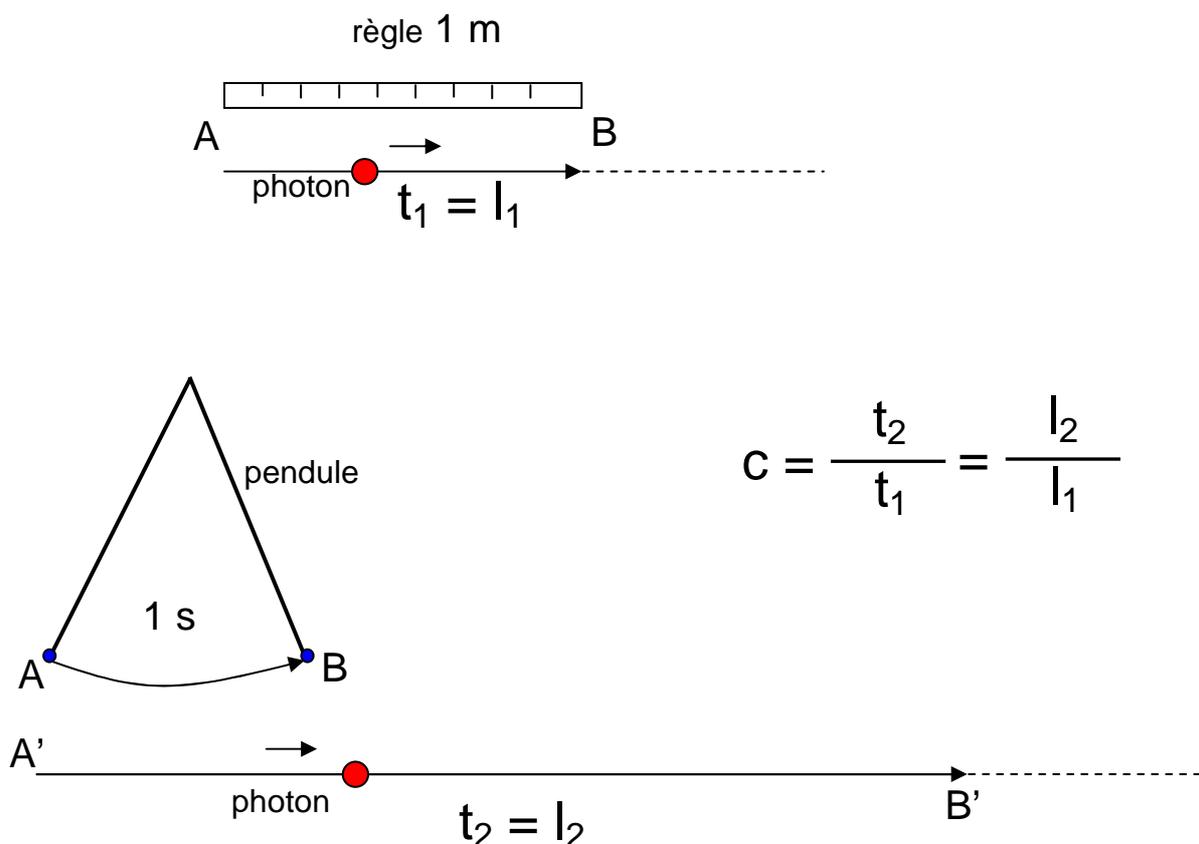


Figure 1 Mesure d'une distance et d'un temps par le mouvement de la lumière, sens donné à la « mesure » de la vitesse de la lumière

On montre ici comment on peut mesurer aussi bien longueurs que durées par le mouvement de la lumière. Une portion de mouvement de la lumière relie de façon indissociable un aspect temporel (le procès du mouvement) et un aspect spatial (l'amplitude du mouvement).

Mesure d'une distance (en haut) : une distance, ou amplitude d'espace, entre A et B (une règle d'un mètre par exemple) est mise en correspondance avec le trajet de la lumière pour aller d'une extrémité à l'autre. Cela prend un temps t_1 , de sens à la fois spatial et temporel ($t_1 = l_1$ via $c = 1$).

Mesure d'un temps (en bas) : le temps associé au déploiement d'un phénomène, par exemple celui d'un pendule pour aller de A à B (une seconde), est mis en correspondance avec le trajet de la lumière pour aller de A' en B' (lorsque le pendule est en A, le photon est en A', lorsqu'il est en B, le photon est en B'). Ce trajet est évalué par le temps ou la longueur $t_2 = l_2$.

Mesure de la vitesse de la lumière :

Dans ce qui précède, la lumière est la jauge des mesures d'espace et de temps (point de vue « nouveau »). Si on redonne momentanément un caractère d'étalons d'espace et de temps à la règle et au mouvement du pendule respectivement, comme s'ils étaient indépendants de la lumière (point de vue « ancien »), on relie les deux points de vue en « affectant » à la lumière la vitesse donnée par le rapport $t_2 / t_1 = l_2 / l_1$; $t_2 = l_2$ est la distance parcourue en une seconde (i.e. en correspondance avec ce que nous désignons comme une seconde dans le point de vue ancien) et, pour l'avoir en mètres (c'est-à-dire en correspondance avec ce que nous désignons par mètre encore dans le point de vue ancien), il faut la diviser par $t_1 = l_1$. En fin de compte, cette « vitesse », ou le rapport d'un espace sur un temps vus comme indépendants (deux unités différentes), est un rapport de deux « portions » de lumière (même unité). Cela introduit aux nouvelles définitions du mètre et de la seconde.

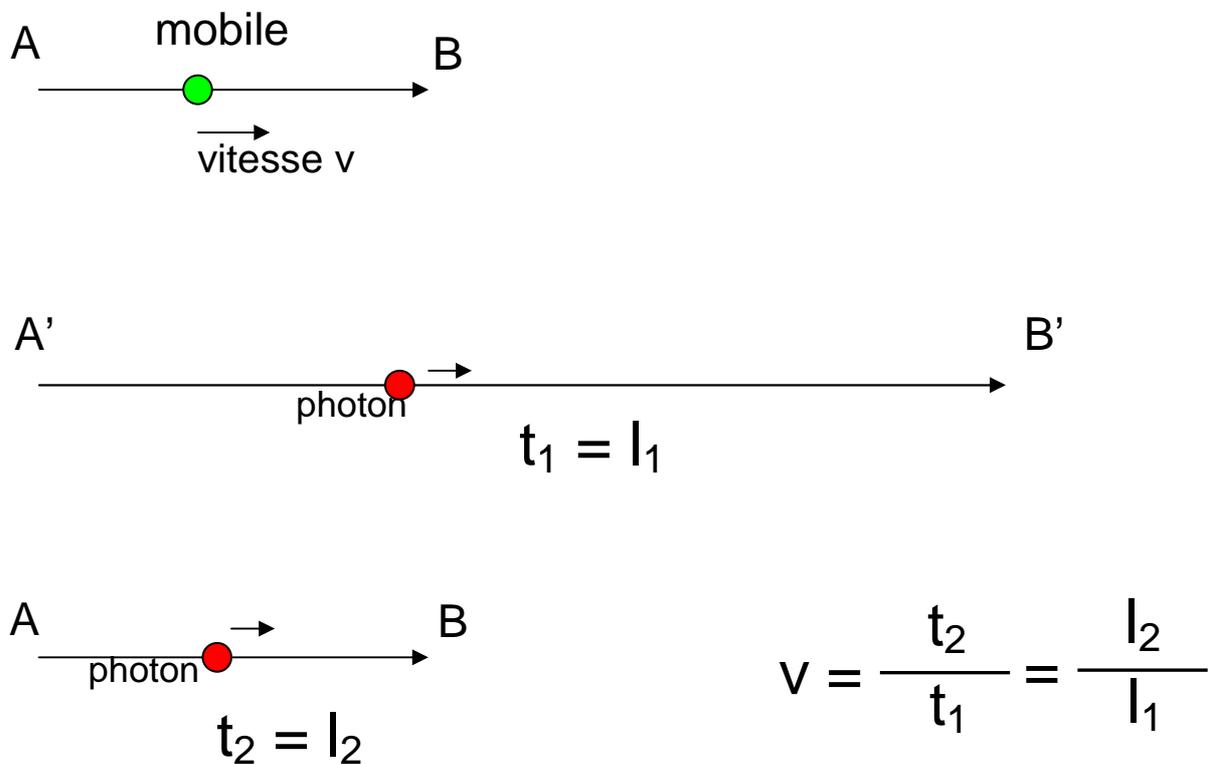


Figure 2 Mesure de la vitesse d'un mobile

Un mobile se déplace de A à B à la vitesse v (à définir) en un temps t_1 . Ce temps est visualisé par le trajet de longueur $l_1 = t_1$ ($c = 1$) parcouru par la lumière pour aller de A' à B' (lorsque le mobile part de A, le photon part de A' ; lorsque le mobile arrive en B, le photon est en B'). La longueur AB est parcourue par le photon en un temps $t_2 = l_2$. La vitesse du mobile dans notre compréhension (reliée aux définitions contemporaines du temps et de l'espace) est le rapport des deux temps ou des deux longueurs : $v = t_2 / t_1 = l_2 / l_1$; c'est bien le rapport d'un intervalle d'espace à un intervalle de temps dans l'ancienne compréhension. La vitesse du mobile est donc définie à partir d'un seul phénomène de propagation, en l'occurrence celui de la lumière. Pour définir une vitesse instantanée, on fait diminuer la longueur AB parcourue.

Sans rediscuter en détail les soubassements conceptuels de notre approche, rappelons que la distance AB en tant que spatialisée renvoie à une « immobilisation » (mouvement « arrêté » de longueur constante) par opposition au photon déclaré se mouvoir avec une constante mobilité. Ces deux « constances » (celle de la longueur et celle de la mobilité) sont définies en composition l'une à l'autre. Une incertitude ou « mal-certitude » fondamentale se cache ici ; on pourrait en effet imaginer ces constances variables, pourvu que leur rapport sauve les phénomènes observés (cf. les définitions relationnelles de l'espace et du temps).

Année / source de la décision	Mesure des longueurs Définition du mètre	Mesure des temps Définition de la seconde
Ancien régime Absence d'autorité unique 1668 1790 Louis XVI	En référence à l'humain : pieds, pouces... Pendule battant la seconde (John Wilkins) Mètre de Burattini (pendule battant la seconde)	Mouvements : cadrans solaires, clepsydes, pendule (Galilée, Huygens)
1791, Académie des sciences, Paris 1796 – 1797 1799	1/10 000 000 ^e partie du quart du méridien terrestre Mètre étalon en marbre Mètre étalon en platine	
1847, Couronne britannique 1884, Conférence internationale de Washington		Fraction 1 / 86400 du jour solaire moyen (temps universel TU, cf. temps moyen de Greenwich)
1889, Bureau des poids et mesures	Mètre étalon, alliage de platine et d'iridium	
1960, 11 ^e Conférence générale des poids et mesures	1 650 763, 73 longueurs d'onde d'une radiation du Krypton 86	Fraction 1 / 31556925,9747 de l'année tropique 1900 (temps des éphémérides TE)
1967, 13 ^e Conférence générale des poids et mesures		Durée de 9192631770 périodes d'une radiation du Césium 133
1983, 17 ^e Conférence générale des poids et mesures	Distance parcourue par la lumière dans le vide pendant 1 / 299 792 458 s	

Tableau 1

Quelques étapes dans la mesure des longueurs et des temps, et dans la définition du mètre et de la seconde
Source : Wikipedia et Lamy (Dictionnaire des unités de mesure, Ellipses, 2004)