

- le cône inférieur (intérieur et surface), représente le *passé* du point-événement O. Celui-ci peut être l'*effet* (ou un effet) de ce qu'il s'est passé en P ; il peut y avoir relation de cause à effet entre P et O,

- l'espace extérieur à ces deux cônes représente l'*ailleurs* (ou le *présent*) du point-événement O. L'événement O ne peut être *ni cause ni effet* des événements s'y déroulant ; il ne peut y avoir aucune relation entre O et A_1 ou A_2 .

Les deux cônes (plus exactement demi-cônes) forment le *cône dit "de lumière"*. Chaque point de l'espace-temps possède le sien.

Les événements se passant dans la région intérieure de ce cône sont dits "*du genre temps*". Ceux se passant dans la région extérieure sont dits "*du genre espace*"¹

Ces propriétés spatio-temporelles, que nous avons pu discerner grâce à la suppression de la dimension Oz, se retrouvent d'une manière tout à fait générale dans l'espace-temps à quatre dimensions.

Il est remarquable que, dans ce que nous venons de décrire, tous les événements se déroulent dans un seul sens. Il n'y a pas possibilité de "recul" dans le temps. Cela s'exprime en évoquant la "*flèche du temps*", irréversible, et pose la question qui suit.

Dans leur écriture, toutes les lois de la physique sont réversibles dans le temps². Leurs équations sont symétriques par rapport à la variable *t*. Elles permettent aux événements de se dérouler dans le sens inverse, comme dans un film passé à l'envers où l'on peut voir une tasse brisée par terre se reconstituer et remonter sur la table en suivant une "chute ascensionnelle". Les lois le permettent, mais la flèche du temps l'interdit... Il y a là matière à réflexion que nous nous permettrons — tout à fait délibérément... — d'aborder dans notre *Annexe 25 : Sur la cosmologie*.

*

Il est rare qu'un exposé sur la relativité ne fasse pas allusion au célèbre "*paradoxe des jumeaux*" plantant un scénario où deux jumeaux se retrouvent avec un âge différent après un long voyage extra-terrestre de l'un d'eux. (Scénario exploité de diverses manières dans de nombreux films d'anticipation.) Cette étrange conclu-

¹ Ces termes deviennent de plus en plus fréquents dans la littérature spécialisée.

² À de très rares et marginales exceptions, non encore vraiment établies.

JUMEAUX
→

sion est doublement intéressante : par sa plausibilité et par le paradoxe (apparent) qu'elle a soulevé.

La plausibilité est maintenant établie depuis l'expérience de Hafele et Keating en 1971, à l'aide d'horloges atomiques de très grande précision, qui peut s'exposer de manière très simplifiée comme suit (Fig. 12b, illustration du début du voyage) :

- les référentiels concernés sont : celui de Copernic R_0 doté de l'horloge de référence H_0 (fictive), le référentiel-Terre doté de l'horloge H_1 située sur l'équateur, et un référentiel-avion effectuant un tour de la Terre le long de l'équateur et emportant l'horloge H_2 .
- du fait du mouvement de la Terre autour du Soleil, son horloge H_1 retarde sur H_0 dans R_0 ,
- dans un premier vol vers l'Est, l'horloge H_2 de l'avion (se déplaçant dans le même sens et plus vite que H_1 dans R_0) retarde encore plus sur H_0 dans R_0 , et retarde donc sur H_1 dans R_0 ,
- dans un deuxième vol vers l'Ouest, l'horloge H_2 se déplace plus lentement que H_1 dans R_0 ; elle retarde sur H_0 mais avance cependant sur H_1 dans R_0 ,
- les calculs théoriques de ces pertes et gains de temps par rapport à H_0 (qui n'a pas besoin d'exister réellement) et à l'avion en mouvement permettent de prévoir la différence des temps "vécus" indiqués par l'horloge embarquée à l'issue de ses deux voyages ¹.

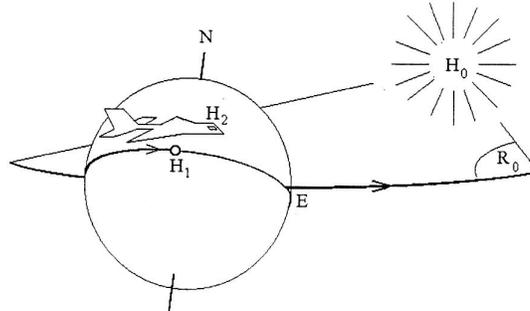


FIG. 12b

¹ Ces vols se sont en réalité effectués en avions de ligne, avec escales.

—/A.

L'expérience prouve bien que l'horloge embarquée et sa "jumelle" terrestre ne "vivent" pas au même rythme, et donc ne vieillissent pas pareillement. Le sens de la différence dépend des conditions, notamment de la vitesse.

Dès la naissance de la relativité restreinte, le troublant voyage du jumeau fut évoqué. Son déplacement était alors imaginé rectiligne et uniforme, comportant un demi-tour qui s'interprétait comme un changement du référentiel par rapport auquel le voyageur est fixe. Dans ces conditions, le voyageur considère que, par rapport à la Terre, il vit plus lentement que son frère et doit donc le retrouver plus vieux que lui. Mais, en vertu du principe de relativité, le frère "terrestre" peut estimer que c'est lui qui se déplace par rapport aux deux référentiels auxquels se rapporte successivement le voyageur et conclure exactement le contraire, à savoir que c'est lui qui doit retrouver son frère plus vieux... Ce paradoxe provient du fait que le principe de relativité restreinte n'est pas applicable. Au moment de son demi-tour, le voyageur a subi un considérable changement de vitesse (en direction, opposée, et en intensité ou en durée), de sorte que le phénomène est du domaine de la relativité générale où interviennent les référentiels non inertiels.

J. HEALY →

*

Le phénomène de *l'aberration* de la lumière a lui aussi posé un problème avant la relativité.

L'astronome James Bradley remarqua, en 1727, qu'une certaine petite étoile fixe décrivait en un an un très petit cercle, de diamètre angulaire ≈ 40 secondes d'arc, autour d'une position moyenne fixe. Il observa des oscillations analogues pour d'autres étoiles, de forme plus généralement elliptique, *mais toujours de même diamètre angulaire maximum* (phénomène de *l'aberration des étoiles*, aussi nommé *aberration de la lumière*.) Il comprit que cela était dû au mouvement de la Terre autour du Soleil, de la manière suivante.

Soit E une étoile fixe située, pour simplifier, sur l'axe perpendiculaire au plan P de l'écliptique terrestre et passant par l'observateur. Sa position précise ne peut être déterminée qu'à l'aide d'un instrument de visée (généralement lunette astronomique ou télescope), de longueur AA' que la lumière met le temps Δt à parcourir. Si la Terre est fixe par rapport aux étoiles fixes, la lunette doit se tenir verticale au plan P (*Fig. 13a.*) Mais si elle se déplace à la