

Quelques éléments de correction

1. De la performance des horloges

Documents 1 à 3

1. C'est un joyeux bazar. Et encore, pour deux protagonistes... Il paraît évident qu'une définition rigoureuse de l'étalon de temps est fondamentale pour le développement humain. Pour des chaussettes, c'est différent, visiblement. Que tout le monde s'entende sur le concept de temps n'élué pas la nécessité de le poser clairement et de lui donner une définition universelle.

Voir l'article de E. Klein : http://www.cea.fr/recherche_fondamentale/le_temps_entre_realite_et_illusion
Transcription d'une conférence : <http://science-for-everyone.over-blog.com/article-4411612.html>

2. Le phénomène physique à la base de la définition de l'unité de temps doit être répétitif à l'identique, c'est-à-dire périodique : de la qualité de la périodicité (phénomènes de dissipation, précision des mesures) dépend la stabilité de l'étalon de temps défini.

3. Les idéaux révolutionnaires ont conduit à la création d'un système métrique garants de l'égalité tout autant que de la simplicité des échanges entre les individus : la seconde n'échappe pas à la règle. Les fondateurs du système métrique formulèrent l'espoir qu'il inaugurerait un système d'unités destiné « à tous et pour l'éternité ».

4. Il semble que la durée correspond à l'étalon de temps – la seconde – soit calée sur la fréquence cardiaque humaine... Surprenant, non ? Ou parfaitement logique... Dans le même ordre d'idées, il est troublant de constater que le pendule qui bat la seconde à Paris ait une longueur proche du mètre.

Documents 5 à 7

5. La période du pendule simple dépend de sa longueur, de la gravité du lieu où l'on se trouve et de l'amplitude des oscillations. Sa longueur est tributaire de l'élasticité et de la dilatation du matériau utilisé ; la gravité dépend de l'altitude du lieu ; l'isochronisme des oscillations n'est vérifié que lorsque l'amplitude reste faible... Autant de raisons qui rendent délicate l'utilisation du pendule comme étalon de temps.

6. Les voyages, des grandes explorations (doc. 5) au développement des chemins de fer, ont rendu indispensable la donnée d'un étalon de temps universel.

7. La longitude d'un point est une coordonnée angulaire définie par rapport au méridien (ligne imaginaire reliant les deux Pôles terrestres) origine de Greenwich.
Si l'horloge est synchronisée sur l'heure de Greenwich, le décalage du midi observé (Soleil au zénith) par rapport au midi qu'elle indique permet d'en déduire la longitude... mais tout se joue sur la stabilité de cette horloge !! Harrison est le premier à avoir fabriqué une horloge suffisamment stable et précise pour mener ces calculs à bien.

8. Le temps solaire vrai n'est pas uniforme à cause de l'excentricité de l'orbite terrestre et dépend du lieu où on le détermine.

9. Le temps solaire moyen est obtenu par correction du temps solaire vrai (équation du temps) mais reste dépendant du lieu où l'on se trouve, notamment à l'échelle de la planète. En 1884, on fait le choix de poser comme temps universel le temps solaire moyen de Greenwich (méridien origine) augmenté de 12 heures ; le développement des télécommunications rend possible cette convention. Les temps locaux sont basés sur ce temps universel, et en diffèrent pas un nombre entier d'heures établi par les fuseaux horaires.

10. Le temps des éphémérides était complexe à établir ; l'apparition des horloges à quartz a permis de montrer qu'il n'était pas stable, notamment à cause des effets de marée et du mouvement de l'axe des Pôles. C'est la naissance de l'horloge atomique qui sonnera le glas du temps des éphémérides. De manière générale, la stabilité d'un étalon de temps mécanique ou astronomique est affectée par le phénomène de dissipation.

Document 8

11. Les atomes sont les mêmes partout dans l'Univers : il semble difficile de faire plus universel.

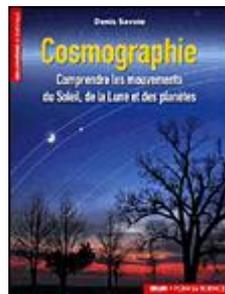
12. $\frac{\Delta t}{t} = 10^{-17}$ soit $t = 10^{17} \times \Delta t$ et, pour $\Delta t = 1$ s, il faut attendre 10^{17} secondes soit plus de trois milliards d'années. C'est 5 fois moins que l'âge de l'Univers, mais cela devient significatif.

13. Lorsqu'en 1967 les physiciens ont proposé d'adopter le Temps Atomique International et donc d'abandonner le Temps Universel, certains astronomes ont vu d'un mauvais œil leur échapper le contrôle du temps, et les navigateurs ont jugé intolérable d'abandonner toute référence à un temps lié à la rotation de la Terre qui leur était indispensable pour faire le point en mer. Il a donc fallu aboutir à un compromis. Car que se serait-il passé si on avait froidement adopté le temps atomique ? On aurait disposé d'une échelle de temps parfaite (le TAI) mais la Terre ralentissant, l'écart entre le TAI et le TU se serait creusé au fil du temps. On aurait ainsi abouti (à très long terme...) à ce qu'il soit midi à la montre (en TAI) alors que le Soleil était à peine levé ! On a donc créé une échelle de temps hybride appelé Temps Universel Coordonné (UTC) défini par les conditions suivantes :

$$\text{TAI} - \text{UTC} = n \text{ secondes}$$

$$|\text{UT} - \text{UTC}| < 0,9 \text{ seconde}$$

ce qui veut dire que dès que la Terre accélère ou ralentit, on doit ajouter ou retrancher une seconde à l'UTC, selon les instructions du Service International de Rotation de la Terre. C'est l'UTC que diffuse l'horloge parlante (ainsi que le GPS), en n'oubliant pas qu'il faut retrancher 1h en période d'hiver et 2h en période d'été. Si on connaît n , qui est un entier ($n = 35$ secondes en 2012), on a ainsi le TAI ; et tout le monde est satisfait puisque l'UTC fournit également l'UT à moins d'une seconde près. En d'autres termes, UTC possède les qualités d'uniformité du TAI (par morceaux) et grâce à des sauts de seconde permet de maintenir en phase la rotation de la Terre avec l'horloge atomique.



Cosmographie : comprendre les mouvements de la Lune, du Soleil et des planètes
Denis Savoie, Belin (2006)

14. $v = \frac{\Delta \ell}{\Delta t}$ donc $\Delta t = \frac{\Delta \ell}{v} = \frac{1}{3 \cdot 10^8} = 3 \cdot 10^{-9}$ s. L'accès à ce degré de précision peut être entravé par le temps de réponse des dispositifs instrumentaux utilisés pour l'atteindre.

15. La fréquence des ondes lumineuses est de l'ordre de 10^{14} Hz : les oscillations mises en jeu sont de l'ordre de 100 000 milliards de périodes à la seconde... ce qui permet d'obtenir une précision théoriquement $10^4 = 10\,000$ fois supérieure à celle des horloges atomiques.

16. Le dispositif d'horloge atomique utilise le phénomène d'interférences.

17. La précision des horloges atomiques est conditionnée par notre capacité à ralentir les atomes et à contrôler leur mouvement : c'est en cela que nos connaissances sur la physique des atomes froids, dont l'agitation est contrôlée, sont essentielles pour accéder à une précision grandissante.

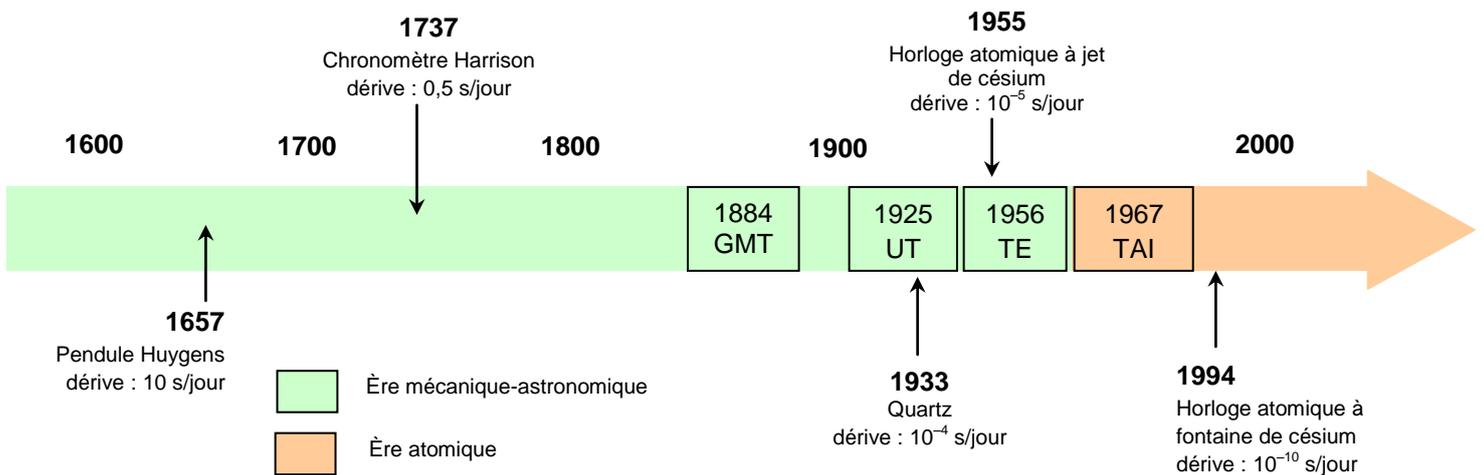
18. L'unité de température mise à part, les six autres unités du SI seront à terme probablement définies à partir de celle de temps, la seconde. La précision de la définition de cette dernière conditionnera donc la construction du système tout entier.

Document 9

19. La courbe n'est pas droite, mais l'évolution qu'elle représente semble plutôt exponentielle : ceci indique que les progrès ont été considérables.

20. En 4 siècles, la précision relative des horloges est passée de 10 à 10^{-16} , soit un gain de 17 ordres de grandeur !!

Synthèse : la frise récapitulative.



2. De la synchronisation des horloges

Comprendre

1. La vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels d'inertie : elle ne dépend pas, par exemple, du mouvement de sa source ou de l'observateur.

2. A et B sont immobiles par rapport à C. En revanche, B s'éloigne du signal émis par C alors que A va à sa rencontre.

3. Tout à fait : les astronautes se voient mutuellement au repos. Les distances de A et de B par rapport à C sont identiques. Le signal électromagnétique transmettant l'information à la vitesse c est reçu simultanément par A et B, qui vont ainsi pouvoir synchroniser leurs horloges.

4. A va à la rencontre du signal, tandis que B fuit le signal. Comme la vitesse de propagation du signal vaut également c pour nous, l'information est captée d'abord par A, et puis, un peu plus tard seulement, par B. Pour nous, les deux événements ne sont donc pas simultanés.

En conclusion, deux événements séparés dans l'espace qui ont lieu simultanément dans un référentiel ne se produisent pas simultanément dans un autre référentiel en mouvement rectiligne uniforme par rapport au premier.

5. A l'instant où A reçoit le signal, B ne l'a pas encore reçu. Par conséquent, l'horloge de A indique déjà l'heure de la réception du signal (heure affichée sur la photo), alors que celle de B n'a pas encore atteint cette heure. Il nous faudra attendre encore un peu jusqu'à ce que l'ordre atteigne le vaisseau B et que son horloge indique le temps de réception du signal (heure affichée sur sa photo). Si des horloges séparées dans l'espace sont synchronisées dans un référentiel où elles sont au repos, elles ne le sont pas dans un autre référentiel où elles sont en mouvement.

En effet, l'horloge qui est « devant », indique une date moins grande. Ce décalage temporel est d'autant plus grand que la distance entre les horloges est grande.

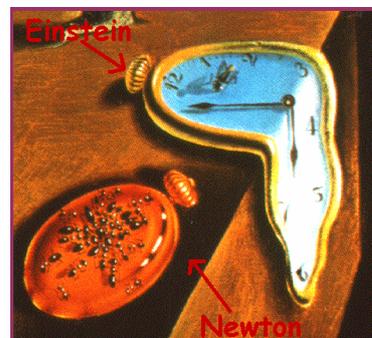
6. A la lumière de ces résultats, comment interpréter les résultats de l'expérience de Hafele-Keating ? Que pensez-vous de la discussion entre les deux internautes ci-dessous ?

L'expérience de Hafele-Keating est l'une des nombreuses preuves expérimentales de la théorie de la relativité initiée par Einstein : elle démontre le caractère relatif du temps dès lors que l'on considère des systèmes en mouvement. En effet, les horloges embarquées dans les vols se désynchronisent : les décalages obtenus sont très bien expliqués par la théorie.

7. Le tableau *Persistence de la mémoire* est un excellent moyen par lequel Salvador Dali réussit à peindre la notion de l'espace-temps.

En effet, le continuum espace-temps est considéré comme étant flexible aux yeux d'Einstein. Cette souplesse nous renvoie alors à l'état des montres du tableau. Il va de soi que celles-ci représentent le temps, mais leur mollesse traduit une certaine notion d'espace ou plutôt de longueurs déformées (allongées). Tout comme un camembert dégoulinant (ayant inspiré Dali, rappelons-le, à la peinture de ce tableau), les montres épousent la forme du support sur lequel elles se trouvent à chaque fois (branche d'arbre, sorte de bureau, ainsi que le « fœtus »). Cela confirme bien que le temps et l'espace sont deux notions totalement indissociables. Les montres molles représentent donc bien l'influence du temps sur l'espace, ou l'inverse, et confirment la théorie d'Einstein à propos d'un espace-temps flexible.

D'ailleurs, cette œuvre Dalinienne témoigne du passage d'un temps absolu, n'ayant aucune influence sur l'espace (comme le voyait Newton), à l'idée de flexibilité et de continuum espace-temps introduite par Einstein. En effet, la montre orange (retournée et recouverte de fourmis), est, tout comme celle à sa proximité, posée sur le même solide, sans pour autant qu'elle soit déformée. Le temps n'a donc aucune influence sur l'espace. Cette situation semble traduire deux opinions différentes (celle de Newton et celle d'Einstein) à propos de l'espace-temps. Peut-être que le choix du peintre catalan de la position de ces deux montres au sein du tableau justifie ce passage des affirmations de Newton (1643-1727) venues bien avant celles d'Einstein.



8. Absolument pas ! Le fait que la mesure du temps dépende du référentiel et du mouvement des systèmes considérés n'entache en rien la recherche de moyens de mesure du temps de plus en plus précis. D'ailleurs, la prise en compte des effets relativistes nécessite des étalons de temps particulièrement précis et stables...

Modéliser

1. La distance $2L$ est parcourue à la vitesse de la lumière c pendant la durée T_0 . Ainsi, $T_0 = \frac{2L}{c}$.

2. Le théorème de Pythagore appliqué au triangle rectangle (ABC) permet d'écrire :

$$c\left(\frac{T}{2}\right)^2 = \left(v\frac{T}{2}\right)^2 + L^2.$$

Comme $L = \frac{cT_0}{2}$, il vient $\left(c\frac{T}{2}\right)^2 = \left(v\frac{T}{2}\right)^2 + \left(\frac{cT_0}{2}\right)^2$

En simplifiant par 2, $(cT)^2 = (vT)^2 + (cT_0)^2$

Modifions l'ordre des termes : $(cT)^2 - (vT)^2 = (cT_0)^2$

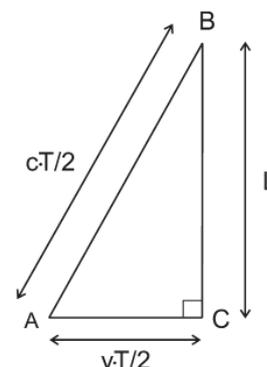
et factorisons par T^2 , $(c^2 - v^2)T^2 = (cT_0)^2$

Ainsi, $T^2 = \frac{(cT_0)^2}{(c^2 - v^2)}$

ou encore $T^2 = \frac{1}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} T_0^2$

On obtient finalement l'expression du temps T mesuré sur Terre en fonction de celui T_0 mesuré dans

le référentiel des astronautes, $T = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}} T_0 = \gamma T_0$



Exemples numériques

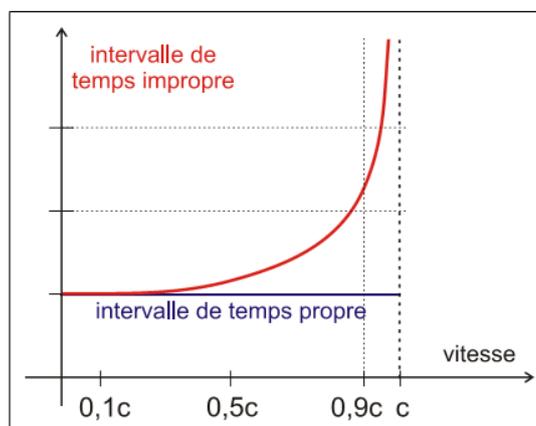
$$v = 0,1c \Rightarrow \Delta t_{\text{impropre}} = 1,005 \cdot \Delta t_{\text{propre}}$$

$$v = 0,5c \Rightarrow \Delta t_{\text{impropre}} = 1,15 \cdot \Delta t_{\text{propre}}$$

$$v = 0,9c \Rightarrow \Delta t_{\text{impropre}} = 2,3 \cdot \Delta t_{\text{propre}}$$

$$v = 0,95c \Rightarrow \Delta t_{\text{impropre}} = 3,2 \cdot \Delta t_{\text{propre}}$$

$$v \rightarrow c \Rightarrow \Delta t_{\text{impropre}} \rightarrow \infty, \text{ quel que soit } \Delta t_{\text{propre}}$$



3. En théorie relativiste, la durée propre est mesurée dans le référentiel dans lequel le système est au repos : c'est un intervalle de temps séparant deux événements dans un référentiel inertiel ou galiléen où ils ont lieu au même endroit dans l'espace. Durées propre et impropre ne se distinguent qu'à condition que la vitesse ne soit pas négligeable devant c .

4. La durée propre est nécessairement plus petite que celle, impropre, mesurée dans d'autres référentiels : les durées s'allongent donc lorsqu'elles sont mesurées dans un référentiel autre que le référentiel propre.

5. Dans les situations de la vie de tous les jours, les effets relativistes sont négligeables ; ce n'est pas le cas pour le GPS, dont le fonctionnement repose sur la transmission des ondes électromagnétiques, à des vitesses proches de c : estimer une durée pour déterminer une distance, oui, mais il faut tenir compte de la dilatation relativiste des durées !

Utiliser et valider le modèle

1. Les muons doivent être apparemment capables de parcourir ces 10 km en 2,2 μs , ce qui leur conférerait une vitesse $v_{\text{app}} = \frac{10 \cdot 10^3}{2,2 \cdot 10^{-6}} = 4,5 \cdot 10^9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. Cette vitesse est 15 fois plus élevée que $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$!

3. Compte tenu de leur vitesse de déplacement, disons 0,994 c pour reprendre l'expérience du CERN, les durées sont dilatées : $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,9994^2}} = 28,87$

Leur durée de vie est donc dilatée d'autant, $T = 29 T_0 = 64 \mu\text{s}$, dans le référentiel d'observation ; sur une telle durée, les muons peuvent parcourir un peu plus de 19 km !

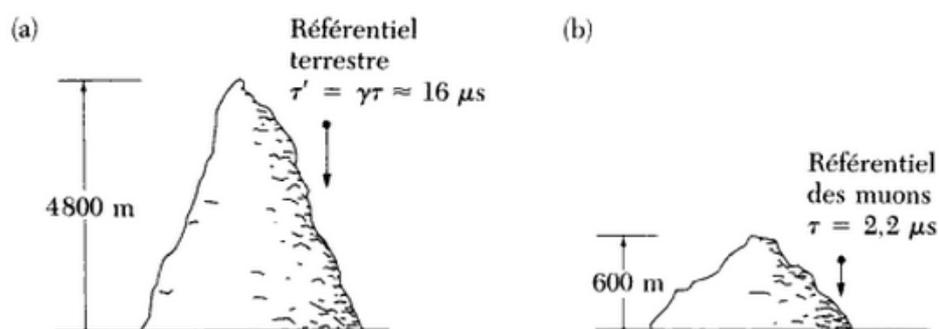


Figure 9.9 (a) Des muons se déplaçant à une vitesse de 0,99c parcourent une distance d'environ 4800 m du point de vue d'un observateur terrestre. (b) Pour les muons, la Terre ne parcourt que 600 m, une distance mesurée dans le référentiel des muons; leur durée de vie est alors d'environ 2,2 μs . À cause de la dilatation du temps, la durée de vie du muon est plus longue si elle est mesurée par un observateur sur Terre.

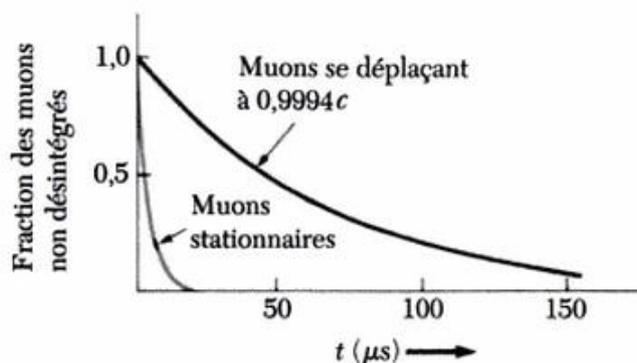


Figure 9.10 Courbes de désintégration des muons accélérés et des muons stationnaires.

4. Séduisant...mais probablement très difficile à concrétiser !! Le franchissement de la vitesse de la lumière est l'une des ficelles de la science-fiction (cf. Star Wars) ou de la science à sensations (cf. neutrinos supraluminiques) !

3. Conclusion

1. A l'époque, les horloges les plus précises ne permettent pas de tester les effets de la théorie relativiste. Jusqu'aujourd'hui, cette théorie n'a pas été mise en défaut.
2. Le GPS est initialement un système militaire ; l'armée américaine brouillait les signaux émis par les satellites du réseau et bridait ainsi la précision afin que le système ne soit utilisé à des fins d'espionnage.
3. Les récepteurs GPS embarquent généralement une horloge à quartz classique dont la dérive n'est pas comparable à celle des horloges atomiques des satellites GPS. Les récepteurs ne peuvent décoder les informations transmises par satellite qu'à condition de disposer d'une horloge synchronisée sur la flotte spatiale. Le GPS nécessite donc une horloge précise (horloge atomique satellitale) et un dispositif de synchronisation (tenant compte, entre autres, des effets relativistes) efficace pour être fonctionnel.

Les signaux transmis par les satellites GPS sont pilotés par une horloge atomique d'une grande précision. Ce n'est pas le cas des récepteurs qui sont équipés d'une horloge à quartz. Celles-ci n'ont ni l'exactitude ni la stabilité d'une horloge atomique et donc dérivent avec le temps. Chaque satellite envoie un message de correction afin d'obtenir le temps GPS exact. L'écart entre le temps GPS et le temps d'une horloge d'un récepteur peut se mettre sous la forme :

$$dt = \frac{1}{c} (\rho_R^s + \Delta_p^{\text{iono}} + \Delta_p^{\text{tropo}} + \Delta_p^{\text{rot}} - R_R^s) + dt^s + dt^e + \Delta t_{\text{rel}}$$

Avec :

- c : la vitesse de la lumière dans le vide ;
- ρ_R^s : la distance réelle entre le récepteur et le satellite ;
- Δ_p^{iono} : la correction ionosphérique calculée par le modèle ;
- Δ_p^{tropo} : la correction troposphérique calculée par le modèle ;
- Δ_p^{rot} : l'erreur due à la rotation de la Terre pendant le temps de trajet du signal ;
- R_R^s : la pseudo distance mesurée (sans tenir compte de la synchronisation) ;
- dt^s : l'écart entre le temps GPS et le temps de l'horloge satellite ;
- dt^e : le retard dû au récepteur (antenne, câble, circuits) ;
- Δt_{rel} : la correction relativiste.

4. Le récepteur doit recalibrer son horloge sur le message envoyé par le satellite en tenant compte de la distance qui l'en sépare, des effets atmosphériques, de la rapidité de ses composants et connectiques, ainsi que de la relativité (restreinte et généralisée). Cet appareil réalise la synthèse des connaissances scientifiques de son époque.

4. Ouverture

Les quatre articles traitent de la science à sensation, celle que les médias relaient.

Le premier article peut se résumer ainsi : « Einstein avait tort, nananère ! » « Alors, les scientifiques tout-puissants, vous faites moins les malins !! ». Pourtant, six mois de « mesures et contre-mesures » s'ensuivront.

"Lorsqu'une collaboration fait une observation aussi inattendue, sans pouvoir l'interpréter, l'éthique de la science demande que les résultats soient rendus publics auprès d'une plus large communauté, afin que ceux-ci soient examinés et pour encourager des expériences indépendantes", a précisé le directeur du CERN, Rolf Heuer. Un rappel important de ce qu'est la science en train de se faire : rigueur, partage des informations, ouverture aux critiques.

On apprend de nos échecs : eh oui, le statut de l'erreur...

La prudence générale s'accompagne aussi du rappel de découvertes majeures sans lendemain. "Dans les années 1980, plusieurs équipes pensaient avoir trouvé un neutrino bien plus lourd que ce qui était prévu. Des dizaines d'articles théoriques ont été publiés pour expliquer leur origine. Finalement, il y avait une erreur dans les expériences", rappelle Thierry Stolarczyk, physicien du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), sur une autre expérience neutrino, Antares. "Suivre des pistes qui peuvent se révéler infructueuses fait partie du jeu."

Le second article ouvre une brèche : l'expérience serait peut-être biaisée.

[...] deux problèmes "pouvaient significativement affecter le résultat". L'un concerne donc cette histoire de branchement. L'autre viendrait d'une horloge de synchronisation des signaux ayant tendance à ne pas battre au bon tempo, ce qui fausse aussi le chronomètre.

Le troisième article reste dans le scepticisme.

A la fin de février, des physiciens qui avaient étudié le fonctionnement d'Opera avaient émis l'hypothèse que ses résultats avaient été faussés par une mauvaise connexion entre un GPS et un ordinateur servant à la mesure. Il en aurait résulté une mauvaise synchronisation entre les horloges utilisées par Opera, un décalage à l'origine d'une mesure erronée de la vitesse des neutrinos.

Quels que soient les résultats qui seront obtenus, l'équipe d'Opera "s'est comportée avec une parfaite intégrité scientifique en soumettant ses mesures au plus grand nombre et en appelant à faire des mesures indépendantes. C'est ainsi que la science fonctionne", insiste M. Bertolucci.

Dans le quatrième article, on pourrait se croire dans l'Equipe : l'entraîneur est remercié à cause des mauvais résultats de son équipe.

En guise d'ouverture, un extrait de l'essai de Bernard Diu, *Traité de physique à l'usage des profanes*, éd. Odile Jacob (2008).

La théorie physique est éminemment hypothético-déductive : elle procède d'un système de postulats ou principes – hypothèses fondamentales ; les concepts et notions qu'introduisent ces postulats pour les relier et les agencer ne se conçoivent pas en dehors de cette théorie, qui les utilise comme les définit.

Par exemple, en électromagnétisme, les équations de Maxwell spécifient les propriétés des champs électriques et magnétiques, et par là même leur être.

Par l'application des règles universelles de la logique et du calcul, les postulats conduisent aux prédictions de tel effet ou de tel phénomène, dans des situations naturelles ou artificielles. Ces prédictions doivent être conformes à la réalité, sorte de juge de paix : c'est ainsi que la survie du château de cartes théorique qui est assurée. La conformité est interrogée par l'expérience, ses observations et/ou mesures quantitatives.

Toute théorie, dès sa naissance, annonce des résultats nouveaux, parfois inattendus, voire inouïs ; certains sont d'ailleurs trop subtils pour les procédés expérimentaux disponibles : les physiciens expérimentateurs appliquent leur génie et leur talent à tester toutes les implications de la théorie. C'est la roulette russe, mais la théorie sait toujours se défendre avant qu'on lui torde le cou.

Tout ce qu'annonce la théorie doit s'avérer, et tout ce que prouve l'expérience soit y figurer par avance : la théorie explore puis déchiffre l'inconnu tout en résistant aux attaques de toutes parts.

La physique est une activité humaine : elle est finie dans ses entreprises et dans ses réalisations. Le résultat d'une expérience ne peut pas être « exact » : il s'accompagne nécessairement d'une incertitude. De la même façon, la théorie admet elle aussi ses approximations.

C'est dans l'expérience que la théorie cherche à fonder sa légitimité. L'expérience ne prime pas, toutefois : aucun dispositif ou résultat expérimental ne peut être conçu ou perçu hors du cadre de la théorie. Repensons à la mise en évidence des ondes électromagnétiques par Hertz en 1887 : l'expérience n'aurait pas pu être envisagée sans le cadre théorique donné par les équations de Maxwell qui confèrent leurs propriétés aux champs électrique et magnétique.