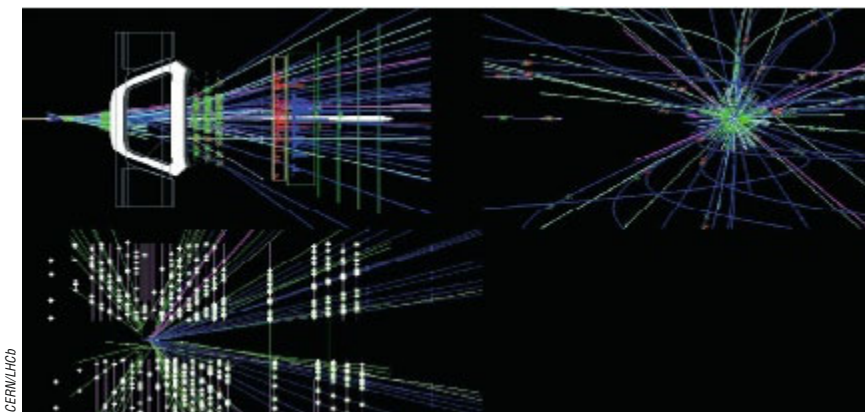




CERN/LHCb

4. LE LHC produit des milliards de mésons B au cours de collisions de paquets de protons. Enregistré le 21 avril 2010, l'événement représenté ici est le premier pour lequel un méson B^+ , composé d'un antiquark $\bar{b}$ et d'un quark u , a été reconstruit. La durée de vie du B^+ est très brève ($1,5 \times 10^{-12}$ seconde) et on ne le détecte que via les empreintes de ses produits de désintégration dans le détecteur LHCb. On voit sur la figure environ une centaine de traces chargées, dont trois seulement sont issues de B^+ , les autres étant dues aux restes de la collision. Cinq mois plus tard, des milliards de paires de quarks $b\bar{b}$ ont été produites au LHCb et des centaines de mésons B chargés ont été reconstruits par les physiciens de cette expérience.

qu'attendu : outre une solution correspondant à l'électron, il en existe une autre associée à une énergie négative. Dirac suppose alors que cette solution d'énergie négative correspond à une particule de charge opposée, sorte d'image dans un miroir de l'électron. C'est elle que nous nommons aujourd'hui positron, antiparticule de l'électron mise en évidence en 1932 par Carl Anderson dans une chambre à brouillard traversée par des rayons cosmiques.

Présente en très faible quantité dans les rayons cosmiques, l'antimatière peut aussi être produite (en quantité égale à la matière) grâce aux accélérateurs de particules. Mises en contact, la matière et l'antimatière s'annihilent en libérant de l'énergie (des photons). L'inverse fonctionne aussi, et à partir d'énergie on peut créer à parts égales des particules de matière et d'antimatière.

Il semble que lors du Big Bang, l'Univers n'était constitué que d'énergie, à partir de laquelle autant de matière que d'antimatière a été créée. Mais un mécanisme inconnu a très légèrement favorisé la matière, au détriment de l'antimatière, laquelle est devenue marginale dans l'Univers connu (rares antiprotons présents dans les rayons cosmiques, positrons créés dans certaines désintégrations β , jets de positrons émis par certains trous noirs...).

L'antimatière est ainsi en quantité négligeable à l'échelle de l'Univers. Cela pose une difficulté de taille. Des mesures qui comparent les nombres de photons et de particules de matière présents

indiquent qu'il a dû y avoir peu après le Big Bang un très léger déséquilibre : pour 10 000 000 000 particules d'antimatière, on devait trouver 10 000 000 001 particules d'antimatière... Les 10 000 000 000 paires particule-antiparticule se seraient annihilées et le petit, tout petit excès de matière, est finalement resté... et ce tout petit excès, c'est nous !

L'asymétrie cosmique reste inexpliquée

L'origine de ce déséquilibre n'est pas comprise ; toutefois, le physicien soviétique Andreï Sakharov a formulé en 1967 les trois conditions nécessaires pour qu'une asymétrie entre matière et antimatière puisse émerger à l'échelle de l'Univers à partir d'une situation symétrique.

La première condition est que les interactions de la matière et de l'antimatière soient asymétriques, en d'autres termes que certaines interactions violent les symétries C et CP (donc T).

Une deuxième condition est l'existence de processus qui ne conservent pas le nombre baryonique, c'est-à-dire tels que le nombre de baryons et le nombre d'antibaryons créés par ces processus soient différents.

La troisième condition est qu'il y ait rupture de l'équilibre thermique. En effet, à l'équilibre thermique, les taux des réactions créant des baryons sont égaux à ceux des processus créant des antibaryons, et il n'y a pas d'asymétrie.

Comme nous l'avons vu, le modèle standard de la physique des particules intègre une violation de CP, mais cette dernière est bien trop petite pour expliquer l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers. À ce propos, le taux de violation de CP mesuré dans la physique des mésons B (parfois de l'ordre de dix pour cent) ne peut pas être comparé directement au léger déséquilibre entre matière et antimatière évoqué : si l'on fait l'hypothèse que la violation de CP ne trouve son explication que dans le cadre du modèle standard, les calculs montrent que l'asymétrie obtenue est un grand nombre d'ordres de grandeur inférieur au léger déséquilibre entre matière et antimatière à l'époque du Big Bang...

Parmi les pistes alternatives, on évoque diverses extensions du modèle standard, avec par exemple la création d'une asymétrie initiale entre leptons et antileptons convertie par la suite en asymétrie entre baryons et antibaryons...

Pour passer de la découverte de l'antimatière dans la première moitié du XX^e siècle aux mesures ultraprécises des différences de comportement entre matière et antimatière dans les mésons B au début du XXI^e siècle, les physiciens ont accumulé plus de 70 ans de progrès théoriques et expérimentaux, durant lesquels ils ont souvent dû, après avoir été surpris, abandonner leurs idées préconçues. Au stade actuel de cette quête, une énigme centrale persiste : si le modèle standard de la physique des particules peut rendre compte des violations de la symétrie CP observées dans le secteur des mésons, il est incapable d'expliquer pourquoi notre Univers semble dépourvu ou presque d'antimatière.

Tout un pan de la réalité physique nous échappe donc, et relève de ce que nous nommons dans notre jargon la « physique au-delà du modèle standard ». Cette « nouvelle physique » fait l'objet de recherches actives, en particulier à l'aide du grand collisionneur proton-proton du CERN, le LHC.

Quoi qu'il en soit, nous savons déjà grâce au théorème CPT que la conséquence directe de la violation de la symétrie CP est celle de T, qui, elle aussi, est observée expérimentalement. L'asymétrie matière-antimatière, si ténue en physique des particules et si massive dans l'Univers, semble décidément liée à la question de la flèche du temps. ■

Parlons-en !

Les grands débats

proposés par le CNRS, en partenariat avec
le musée du quai Branly et la mairie de Paris



Biologie synthétique : a-t-on le droit de fabriquer le vivant ?

Jeudi 28 octobre 2010 à 19 heures

Salon de lecture Jacques Kerchache, musée du quai Branly

Entrée libre. Informations sur www.cnrs.fr/lesgrandsdebats

Suivez le débat en ligne dès 19 heures
sur www.20minutes.fr

SCIENCES
SUR SEINE
2010

© CNRS - conception graphique Sarah Landet, adaptation Monwenia Moat



www.cnrs.fr



*musée du quai Branly
LE MUSÉE DES CIVILISATIONS D'AUTREFOIS ET D'AUJOURD'HUI

MAIRIE DE PARIS



POUR LA
SCIENCE

MESURER LE TEMPS

Les dernières horloges atomiques mesurent le temps avec une erreur inférieure à une seconde pour trois milliards d'années. En orbite dès 2013, l'horloge atomique PHARAO testera la théorie de la relativité et la dérive éventuelle des constantes fondamentales de la physique.

Christophe Salomon

En soulevant avec un cric la dernière née des horloges atomiques, des physiciens américains du Colorado ont montré qu'il était possible de détecter un effet de la relativité générale – le décalage des horloges en fonction de l'altitude – dès 30 centimètres de hauteur. Pendant ce temps, en Europe, le modèle de vol de l'horloge spatiale PHARAO est en cours d'assemblage ; il vise à tester la relativité générale au millionième près avec des atomes ultrafroids à bord de la Station spatiale internationale en 2013. Quel est le lien entre ces deux expériences ? À quoi servent les horloges atomiques ? Quels sont leurs enjeux ? Pour le comprendre, revenons quelques millénaires en arrière.

La quête de la précision

Depuis l'Antiquité, les hommes ont cherché à mesurer le temps où, plus précisément, les intervalles de temps. Ils se sont d'abord tournés vers les phénomènes naturels qui présentent une grande régularité comme la rotation de la Terre autour du Soleil, celle de la Lune autour de la Terre ou encore celle de la Terre sur elle-même pour définir des calendriers et des échelles de temps. Ils ont ensuite cherché à réaliser eux-mêmes des instruments toujours plus précis et l'un des plus anciens instruments connus est le sablier égyptien. Cependant, il faudra attendre la découverte de l'isochronisme du pendule par Galilée, au début des années 1600, et sa mise en pratique par le physicien néerlandais Christiaan Huygens quelques décennies plus tard, pour que ces instruments commencent à atteindre une précision de l'ordre de quelques dizaines de secondes par jour.

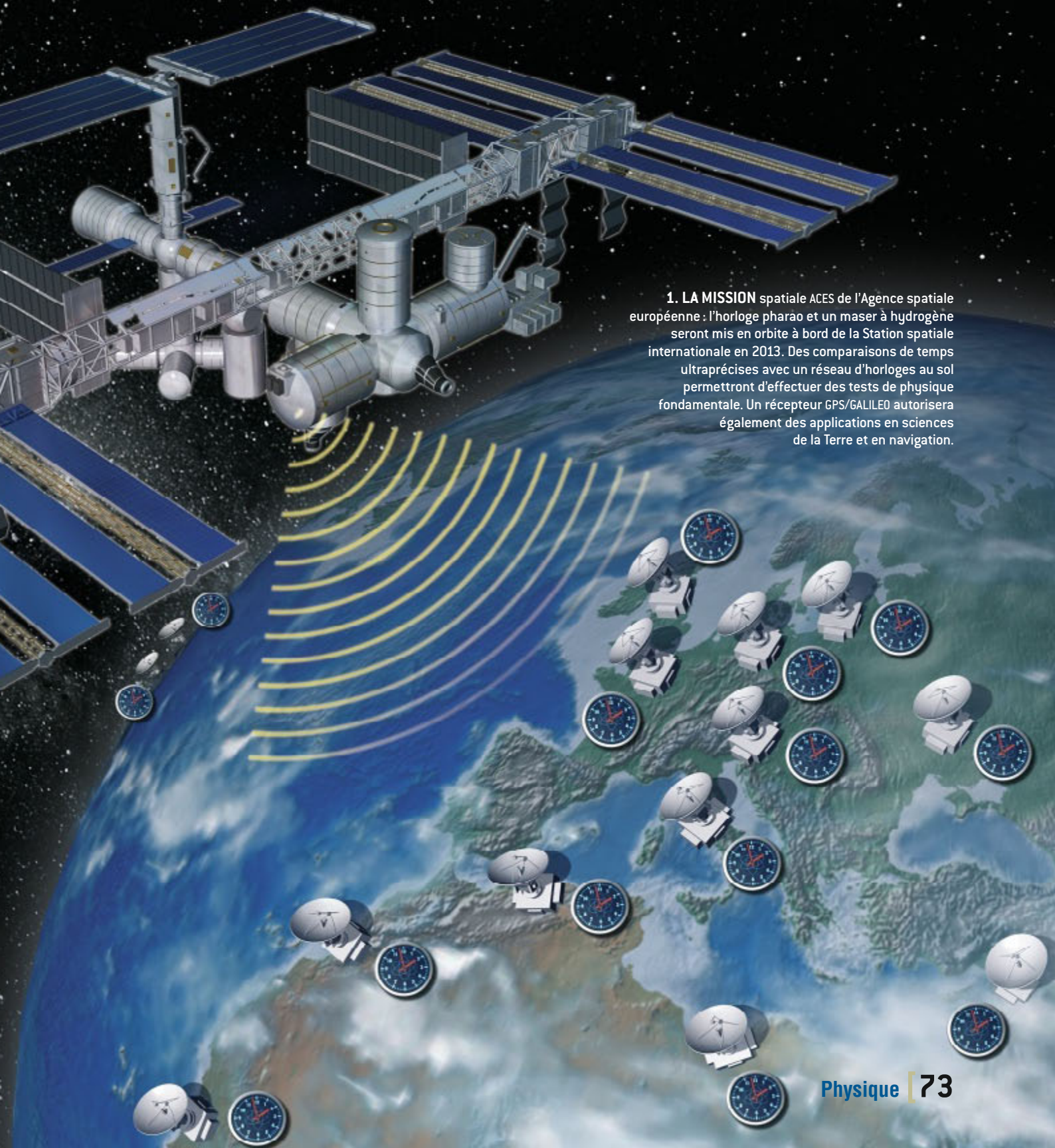
Galilée a observé que les petites oscillations du pendule sont indépendantes de l'amplitude du mouvement et sont remarquablement

L'ESSENTIEL

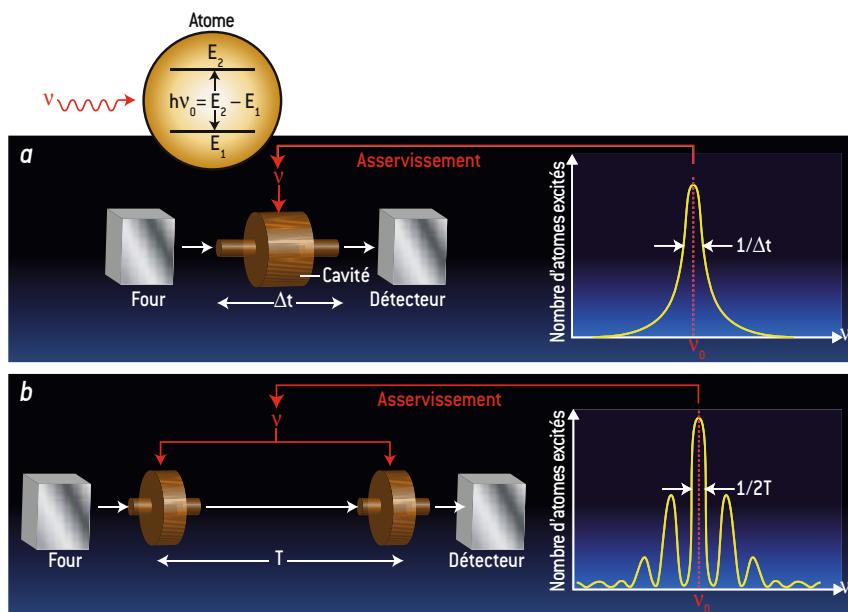
- ✓ Une horloge est un système qui oscille de façon régulière.
- ✓ Dans une horloge atomique, ces oscillations sont celles du champ électromagnétique produit par un oscillateur à quartz, un maser ou un laser.
- ✓ Pour éviter toute dérive, la fréquence de ce champ est verrouillée sur une fréquence caractéristique d'un atome.
- ✓ Bientôt envoyée dans l'espace, une telle horloge testera la théorie de la relativité et la stabilité des constantes fondamentales de la physique.

Bruno Bourgeois

AVEC DES ATOMES



1. LA MISSION spatiale ACES de l'Agence spatiale européenne : l'horloge pharao et un maser à hydrogène seront mis en orbite à bord de la Station spatiale internationale en 2013. Des comparaisons de temps ultraprécises avec un réseau d'horloges au sol permettront d'effectuer des tests de physique fondamentale. Un récepteur GPS/GALILEO autorisera également des applications en sciences de la Terre et en navigation.



2. PRINCIPE D'UNE HORLOGE ATOMIQUE : une onde électromagnétique de fréquence ν excite un ensemble d'atomes de césium de l'état d'énergie E_1 à l'état d'énergie E_2 . Issus d'un four, les atomes forment un jet qui traverse une cavité où l'onde est appliquée. Le détecteur compte le nombre d'atomes portés dans l'état excité. Lorsqu'on balaye la fréquence de l'onde autour de ν_0 , le nombre d'atomes excités fournit une courbe en cloche dont la largeur est inversement proportionnelle au temps d'interaction Δt de l'onde et des atomes. Un asservissement électronique permet de verrouiller la fréquence du rayonnement sur la fréquence de l'atome (a) ; une variante consiste à séparer l'onde appliquée en deux parties (b). Les atomes subissent deux interactions successives séparées d'un intervalle de temps T . Il en résulte un phénomène d'interférences qui produit des franges de largeur $1/2T$. Plus les atomes sont lents, plus les franges seront étroites et meilleure sera l'horloge.

régulières, c'est-à-dire périodiques. En comptant le nombre d'oscillations du pendule, on mesure un intervalle de temps, réalisant ainsi une horloge. Plus la période est courte, plus élevé sera le nombre d'oscillations dans un intervalle de temps donné, et plus précise sera la mesure.

La période T du pendule ne dépend que d'un petit nombre de paramètres, la longueur du fil l et l'accélération de la pesanteur g : $T = 2\pi(l/g)^{1/2}$. Cette formule simple montre les limites du dispositif : si la longueur du fil change, à cause de la température par exemple, l'horloge perdra sa précision ; il en est de même si l'accélération de la pesanteur change (par exemple si l'on prend de l'altitude).

Poussés par les enjeux de la navigation transocéanique et la détermination de la longitude, mais aussi par les sommes promises par les souverains des deux siècles suivants, les pendules, montres mécaniques et chronomètres n'ont cessé de s'améliorer. Combattant l'influence néfaste des changements de température et d'humidité sur le fonctionnement de ses chronomètres, l'horloger britannique John Harrison finit par produire en 1759, après 40 années d'efforts, un instrument qui présentait une erreur inférieure à un dixième de seconde par jour. Son chronomètre, qui alliait une mécanique de précision à un choix astucieux de métaux, fut testé en mer

par un navire britannique qui fit l'aller-retour Portsmouth-les Antilles en un peu moins de trois mois. Au retour, le chronomètre embarqué avait moins de cinq secondes d'écart avec ceux restés au sol. Harrison reçut pour cet exploit un prix de 40000 livres, une somme considérable pour l'époque !

La percée scientifique suivante fut l'invention de l'oscillateur à quartz en 1918. Le système périodique n'est plus un système mécanique, mais un champ électromagnétique oscillant reposant sur les propriétés piézo-électriques du quartz. La vibration mécanique du cristal de quartz produit un champ électrique oscillant à une fréquence bien définie et bien plus élevée que celle du pendule (quelques millions d'oscillations par seconde). Les montres et oscillateurs à quartz ont envahi le monde moderne et constituent une base de temps suffisamment stable pour la plupart des applications courantes.

Cependant, comme le pendule, mais à un degré bien moindre, l'oscillateur à quartz présente des dérives en température. Pour domestiquer ces oscillateurs, les physiciens ont eu l'idée de réaliser une horloge atomique qui combine les propriétés de l'oscillateur à quartz et celles de l'atome. L'énergie d'un atome est quantifiée : elle ne peut prendre que des valeurs discrètes, déterminées par les lois de la mécanique quantique qui gouverne le

comportement des objets microscopiques. Les niveaux d'énergie correspondant à ces valeurs ne dépendent pas de la température (ou plus exactement très, très peu !). Les atomes sont universels : un atome de césium à Paris présentera exactement les mêmes propriétés qu'un atome de césium à New York ou à Tokyo. Ce n'est pas le cas des pendules ou des oscillateurs à quartz, difficiles à réaliser à l'identique. L'idée est donc d'empêcher la dérive de l'oscillateur à quartz en verrouillant – en asservissant – la fréquence de ses oscillations sur une fréquence caractéristique de l'atome, correspondant à la différence entre deux niveaux d'énergie particuliers.

Pour ce faire, on envoie un jet d'atomes dans une cavité soumise au champ électromagnétique produit par l'oscillateur à quartz. Les deux niveaux d'énergie atomiques considérés sont E_1 (fondamental) et E_2 (excité), séparés par une énergie $h\nu_0$, où ν_0 est une fréquence et h la constante de Planck. Avant leur passage, les atomes sont dans l'état d'énergie E_1 ; lorsque la fréquence de l'onde électromagnétique appliquée à la cavité est proche de ν_0 , les atomes sont portés dans l'état excité E_2 . Un détecteur compte le nombre d'atomes excités quand on balaye la fréquence de l'onde autour de ν_0 : on obtient une courbe en cloche – dite courbe de résonance – centrée sur ν_0 dont la largeur est inversement proportionnelle à la durée d'interaction de l'onde et des atomes. Par rétroaction, un montage électronique verrouille la fréquence de l'onde sur la fréquence ν_0 de l'atome : le montage électronique vérifie en permanence que la fréquence de l'oscillateur à quartz est très proche de ν_0 et la corrige si elle s'éloigne de cette valeur (voir la figure 2a).

Horloges à césium : atomes chauds, atomes froids

La première horloge à césium réalisée en Angleterre par Louis Essen et Jack Parry en 1955 fonctionnait sur ce principe, amélioré grâce à une méthode proposée par le physicien américain Norman Ramsey (qui lui vaudra le prix Nobel en 1989) : l'onde électromagnétique produite par l'oscillateur à quartz est divisée en deux parties, qui interagissent chacune avec les atomes sur leur parcours. Cette double interaction entraîne des interférences qui affinent d'autant plus le signal transmis

par le détecteur que l'intervalle de temps entre les deux interactions est grand (voir la figure 2b). L'erreur journalière de cette première horloge à césium n'était ainsi que de 0,00001 seconde, bien plus faible que l'erreur d'un quartz ou des meilleurs systèmes mécaniques.

La 13^e Conférence générale des poids et mesures de 1967 choisit ainsi l'atome de césium pour donner la définition actuelle de la seconde du système international d'unités : « La seconde est la durée de 9192631770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état électronique fondamental du césium 133. » Depuis cette époque, plusieurs milliers d'horloges à césium commerciales ont été produites pour de nombreuses applications, dont le système de géolocalisation par satellite GPS.

Au début des années 1990, les atomes refroidis par laser ont permis d'augmenter encore la précision des horloges à césium de deux ordres de grandeur. En effet, à une température de un millionième de degré au dessus du zéro absolu, les atomes de césium ont une vitesse d'agitation de seulement sept millimètres par seconde, soit 30 000 fois plus lente qu'à température ambiante. Ils peuvent alors être utilisés en fontaine atomique, c'est-à-dire être projetés en l'air à la verticale à travers la cavité soumise à l'onde excita-

trice, et retomber par le même chemin (voir la figure 3). Par cette méthode, on obtient un intervalle de temps entre les deux interactions avec l'onde électromagnétique excitatrice approchant une seconde – une durée 100 à 1 000 fois plus longue que dans l'horloge à jet atomique de Essen et Parry. Ces horloges présentent une erreur de dix picosecondes (10^{-12} seconde) par jour et sont aujourd'hui à la base de la réalisation du Temps atomique international (TAI), le temps de référence au niveau mondial. Aujourd'hui, une vingtaine de fontaines atomiques sont en fonctionnement dans le monde et sont régulièrement comparées entre elles pour réaliser le TAI.

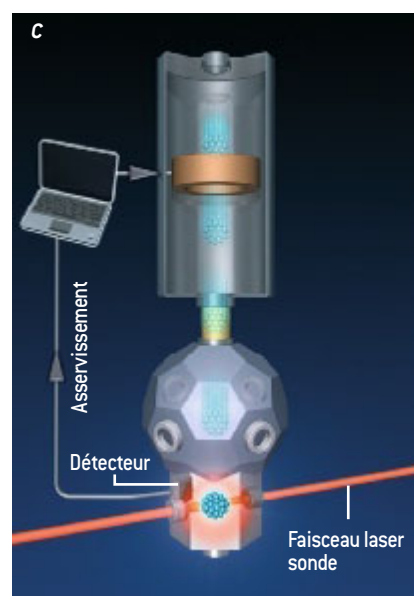
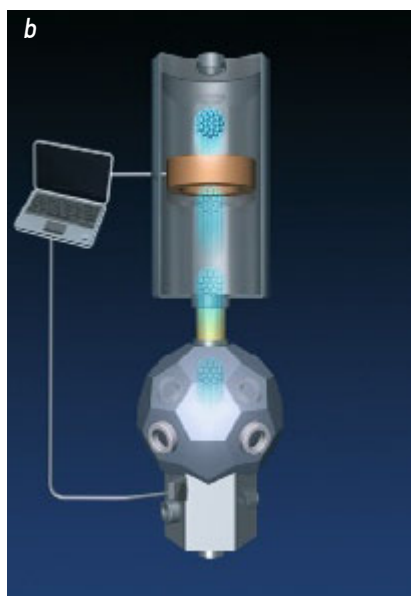
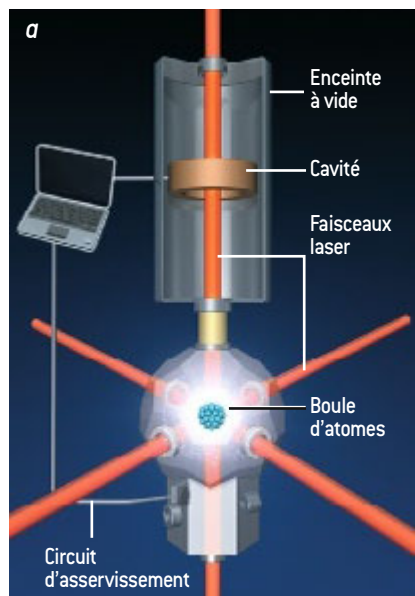
L'avènement des horloges optiques

Ces deux dernières années, de nouveaux développements sur les horloges atomiques ont permis d'approcher la picoseconde d'erreur par jour, soit moins d'une seconde tous les trois milliards d'années ou encore 15 secondes sur l'âge de l'Univers ! Ces nouvelles horloges sont des horloges optiques : les atomes sont excités non plus par un champ électromagnétique de fréquence 10^{10} hertz (l'équivalent d'un pendule qui battrait à dix milliards de périodes par seconde), comme dans l'horloge à césium, mais par un champ

lumineux qui oscille 100 000 fois plus vite, à 10^{15} hertz.

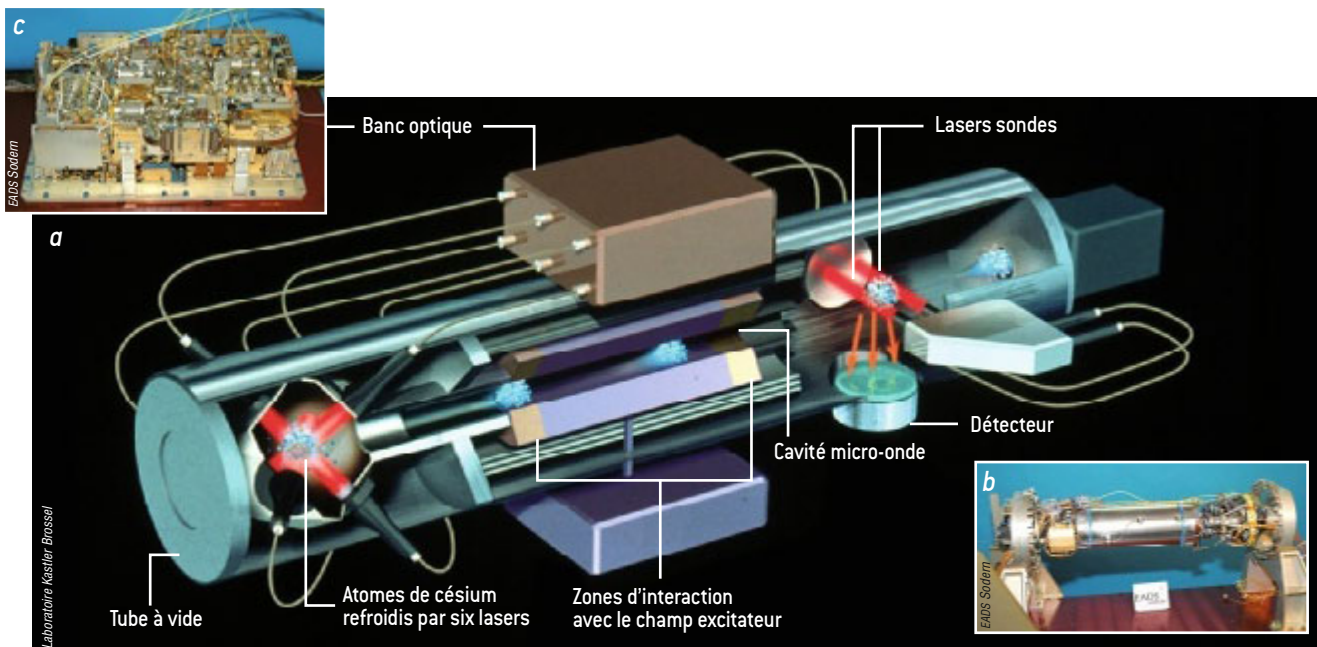
Ce champ lumineux est produit par un laser qui, comme l'oscillateur à quartz, est asservi sur une transition entre deux niveaux d'énergie des atomes. Cette transition correspond à une fréquence du spectre visible ou du proche ultraviolet. Les oscillations du champ lumineux étant bien plus rapides que celles du pendule, leur période est aussi beaucoup plus courte ; la mesure d'un infime intervalle de temps en comptant un nombre entier de périodes est donc *a priori* plus aisée avec une horloge optique qu'avec un pendule. Toutefois, comment compter ces oscillations si rapides ? Aucun photodétecteur n'est capable de répondre à un champ qui oscille aussi vite.

C'est ici que la contribution des prix Nobel de physique 2005, John Hall et Theodor Hänsch, est cruciale. Ces deux chercheurs et leurs équipes ont mis au point un « diviseur » de fréquences optiques efficace et simple à mettre en œuvre. Il repose sur l'utilisation d'un laser femtoseconde – un laser qui émet des impulsions ultracourtes (d'une durée de l'ordre de quelques femtosecondes, soit 10^{-15} seconde). Dans le domaine des fréquences, ces impulsions se traduisent par des raies régulièrement espacées, à l'image des dents d'un peigne – d'où leur nom « peigne de fréquence ». L'espacement des dents du peigne



3. UNE HORLOGE À FONTAINE ATOMIQUE : les atomes de césium sont refroidis par laser à une température de un microkelvin (a) et lancés vers le haut avec une vitesse de quatre mètres par seconde (b). Ils retombent selon le même chemin sous l'effet de la gravité (c). À la montée et à la descente, ils traversent la cavité micro-onde qui contient le champ excitateur. La durée entre les deux interactions atomes-champ

atteint 0,5 seconde et est environ 100 fois plus longue que dans une horloge à jet thermique. Les atomes excités par le champ micro-onde sont comptés par la fluorescence qu'ils émettent lorsqu'ils sont éclairés par un faisceau sonde (c). Un détecteur transmet l'information à un ordinateur qui verrouille la fréquence du champ excitateur sur la fréquence ν_0 de l'atome.



4. PRINCIPE de l'horloge à atomes froids PHARAO en microgravité [a]. Les atomes de césium sont refroidis par laser dans une chambre à vide (à gauche), puis envoyés lentement dans une cavité micro-onde où ils subissent deux interactions successives avec le champ excitateur produit par un maser à hydrogène et accordé sur la fréquence de l'atome de césium. Les atomes excités sont ensuite détectés par fluorescence provoquée par laser (à droite). Comme dans la fontaine atomique, le champ excitateur est asservi sur la fréquence de l'atome de césium grâce à un montage électro-

nique qui transmet au maser la fréquence mesurée par la fluorescence. Pour une vitesse de lancement de dix centimètres par seconde, la largeur de la résonance attendue en microgravité est 0,2 hertz, soit cinq fois plus étroite que dans une fontaine atomique en présence de gravité. Le tube à vide qui contient l'ensemble mesure 90 centimètres de long et pèse 45 kilogrammes [b]. Le banc optique, qui produit et stabilise les lasers du montage, occupe un volume de 30 litres et pèse 20 kilogrammes [c]. Les faisceaux sont acheminés jusqu'au tube par fibres optiques.

est facilement mesurable, car il appartient au domaine des ondes radio, et chaque dent du peigne possède une fréquence qui est un multiple entier de cet espacement.

Asservi, comme le champ lumineux excitateur, sur la transition atomique, le laser femtoseconde sert de règle graduée : en combinant le champ lumineux excitateur et le peigne de fréquence, il est possible de déterminer la dent du peigne la plus proche de la fréquence du champ excitateur, ce qui permet de relier les fréquences rapides du domaine optique au domaine radio où les signaux oscillants sont plus lents. Ces signaux peuvent alors être transmis simplement par des câbles, et les périodes d'oscillation comptées par des méthodes électroniques usuelles. Le diviseur peut aussi être utilisé en sens inverse, comme multiplicateur, et réaliser, à partir des basses fréquences, des références de fréquences précises dans le domaine visible du spectre.

L'amélioration des performances des horloges est spectaculaire : en un peu plus de quatre siècles, les meilleures horloges atomiques ont gagné 13 ordres de grandeur par rapport au pendule de Huygens et, sur les 50 dernières années, le gain est d'un facteur 10 tous les dix ans.

Revenons au principe des fontaines atomiques. Nous l'avons vu, dans la

méthode inventée par N. Ramsey, il n'est pas nécessaire que le champ oscillant éclaire en permanence les atomes. Deux interactions successives suffisent et c'est l'intervalle de temps entre ces interactions qui donne la précision de l'horloge : plus l'intervalle de temps est grand, plus l'horloge est précise. Pour allonger ce temps, il est donc tentant de lancer les atomes de la fontaine le plus haut possible : une expérience à l'Université Stanford explore cette direction avec une fontaine de dix mètres de haut. De telles dimensions apportent cependant de nouvelles contraintes, et le gain en précision attendu n'évolue que comme la racine carrée de la hauteur ; dans cette expérience, il sera d'un facteur trois par rapport aux fontaines en fonctionnement.

S'affranchir de la pesanteur...

Une solution plus radicale est de s'affranchir de l'accélération de la pesanteur. Dans une fontaine atomique, pour contrer la gravité et projeter suffisamment haut les atomes, il faut leur donner une vitesse assez grande, de l'ordre de quatre mètres par seconde ; en impesanteur, en revanche, il est possible d'envoyer la boule d'atomes refroidis à une vitesse 40 fois inférieure

– de l'ordre de dix centimètres par seconde –, ce qui permet d'augmenter considérablement le délai entre les deux interactions avec le champ oscillant. C'est le projet spatial PHARAO (Projet d'horloge atomique par refroidissement d'atomes en orbite) conduit par le CNES et des laboratoires français.

Le principe de l'horloge en microgravité PHARAO s'apparente à celui de l'horloge de Essen et Parry, où les atomes du jet atomique sont remplacés par un jet ultra-lent d'atomes refroidis par laser (voir la figure 4). L'absence de gravité qui règne à bord d'un satellite permet aux atomes d'évoluer à vitesse constante et les deux zones d'interaction sont séparées spatialement. Dans un dispositif compact, on espère produire une courbe de résonance cinq à dix fois plus étroite que dans une fontaine atomique, soit près de 10 000 fois plus étroite que dans une horloge commerciale.

L'horloge PHARAO sera un élément central de la mission spatiale européenne ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) de l'Agence spatiale européenne (ESA). La charge utile ACES sera installée en 2013 à bord de la Station spatiale internationale, en orbite autour de la Terre à une altitude moyenne de 400 kilomètres selon une période d'environ une heure et demie, soit 5 400 secondes.

Outre l'horloge PHARAO, la mission spatiale ACES comporte un maser à hydrogène développé en Suisse, qui remplace l'oscillateur à quartz, un système de comparaison de temps sol-bord ultraprécis par échange de signaux radio développé en Allemagne, un transfert de temps par laser, un récepteur GPS/GALILEO (le futur système européen de localisation par satellite) et des équipements de support (ordinateur de bord, ...). L'ensemble pèse 220 kilogrammes et consomme moins de 450 watts, soit la puissance requise pour faire fonctionner en même temps... sept lampes à incandescence de 60 watts.

... pour vérifier l'effet Einstein

Les objectifs scientifiques d'une telle mission comportent plusieurs volets. Tout d'abord, l'horloge PHARAO en microgravité et le maser à hydrogène réaliseront dans l'espace une échelle de temps combinée de très haute stabilité. Le maser à hydrogène est en effet une horloge atomique très stable à court terme, alors que l'horloge PHARAO est très stable à moyen et long termes. En asservissant le maser sur l'horloge PHARAO, on combinera ces propriétés, qui conduiront à une échelle de temps très stable à court, moyen et long termes.

Cette échelle de temps sera comparée à celle fournie par un réseau d'horloges au sol. Il sera alors possible de mesurer avec une grande précision l'effet Einstein, le décalage gravitationnel des horloges prévu par la relativité générale : la fréquence de l'horloge PHARAO, mesurée par le réseau d'horloges au sol, apparaîtra plus élevée que la fréquence des horloges terrestres d'une quantité gH/c^2 , où g est l'accélération de la pesanteur, H l'altitude de la station spatiale et c la vitesse de la lumière. En d'autres termes, le temps s'écoule plus vite lorsqu'on s'éloigne du champ gravitationnel de la Terre.

À l'altitude de 400 kilomètres, on attend un décalage relatif en fréquence de $4,5 \times 10^{-11}$. Avec des horloges stables dont l'incertitude en fréquence n'excède pas 10^{-16} , l'effet Einstein pourra être testé à 2×10^{-6} près – une amélioration d'un facteur 70 par rapport à la précédente expérience spatiale *Gravity Probe A* de la NASA en 1976. Cette expérience a comparé pendant deux heures la fréquence d'un maser envoyé à bord d'une

fusée sonde à 20 000 kilomètres d'altitude à celle d'un maser au sol et constitue encore aujourd'hui le test le plus précis de l'effet Einstein.

En second lieu, grâce à cette échelle de temps spatiale très stable, il sera possible de comparer entre elles les diverses horloges au sol qui participeront à la mission. Celles-ci fonctionnent souvent sur des principes physiques différents, utilisent d'autres atomes ou encore d'autres transitions atomiques. Cela permettra alors de tester une idée soulevée par le physicien britannique Paul Dirac (1902-1984) : les constantes fondamentales de la physique sont-elles invariables dans le temps ? L'objectif de la mission ACES est ici de réaliser un tel test au niveau global avec une sensibilité de 10^{-17} par an.

Par exemple, la « constante de structure fine » qui caractérise l'interaction électromagnétique et qui est responsable de la stabilité des atomes et des molécules a-t-elle évolué depuis les premiers âges de l'Univers ? Ou encore le rapport des masses des constituants fondamentaux de la matière que sont les protons et les électrons change-t-il avec l'âge de l'Univers ? L'enjeu de cette recherche est considérable : si l'on détecte une variation de l'une de ces quantités, ce sera le signe que le principe d'équivalence, l'un des fondements, depuis les travaux d'Einstein, de notre description actuelle de la physique, est violé. Cela indiquerait que de nouvelles interactions ou nouvelles forces sont en jeu, qu'il faudra découvrir et étudier... Rappelons que les astrophysiciens nous indiquent que près de 80 pour cent de la masse de l'Univers visible aujourd'hui est constituée de matière noire d'origine inconnue : cette matière interagirait-elle avec la matière visible selon un type de force encore inconnu ?

Mesurer le géoïde terrestre

Outre les tests des lois fondamentales de la physique et l'amélioration du Temps atomique international par comparaison entre horloges, la mission ACES comporte des objectifs scientifiques appliqués. Le premier a trait à la géodésie. Une fois testée la validité du décalage gravitationnel des horloges, on pourra utiliser l'effet Einstein pour évaluer le relief terrestre selon une nouvelle méthode : la détermination de la différence des potentiels gravitationnels entre deux horloges distantes.

L'AUTEUR



Christophe SALOMON, directeur de recherche au CNRS, dirige le groupe « Gaz de Fermi ultrafroids » au sein du Laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure, à Paris, une des équipes engagées dans le projet PHARAO.

✓ POUR INFO

Le 27 novembre, la Société française de physique et la Bibliothèque nationale de France organisent la **12^e rencontre Physique et interrogations fondamentales** sur le thème : « Aux frontières de la connaissance : les instruments de l'extrême ». Christophe Salomon y évoquera à 10h15 la mesure du temps. Pour en savoir plus : <http://sfp.in2p3.fr/CP/pifn/fren12.htm>

✓ BIBLIOGRAPHIE

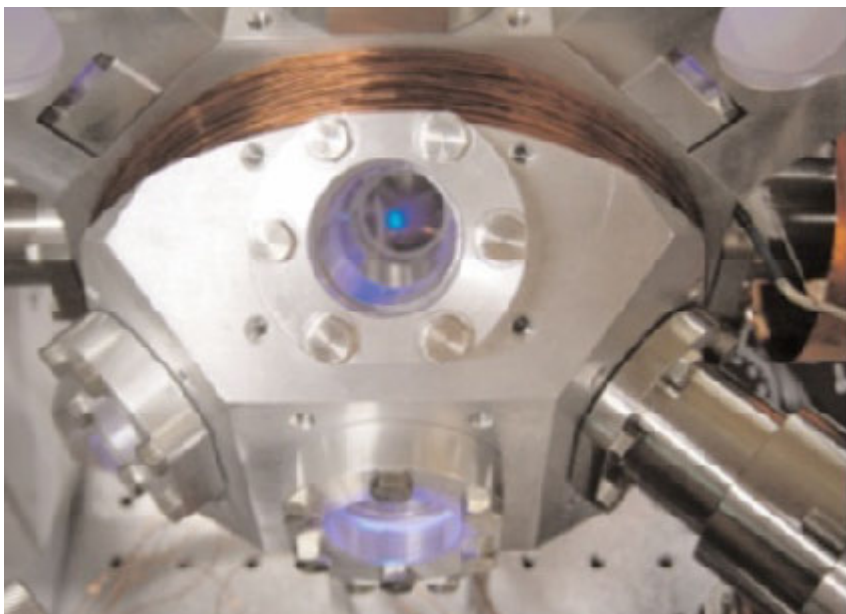
L. Cacciapuoti et Ch. Salomon, *Space clocks and fundamental tests : the ACES experiments*, *European Physical Journal [Special topics]*, vol. 172, pp. 57-68, 2009.

S. Schiller et al., *Optical clocks in space*, *Nuclear Physics B [Proc. Suppl.]*, vol. 166, pp. 300-302, 2007.

G. M. Tino et al., *Atom interferometers and atomic clocks : new quantum sensors for fundamental physics experiments in space*, *Nuclear Physics B [Proc. Suppl.]*, vol. 166, pp. 159-165, 2007.

Le site Internet du projet PHARAO : <http://smc.cnes.fr/PHARAO/Fr/>

M. Mashaal, *La relativité à l'épreuve du décimètre*, *Pour la Science*, 23 septembre 2010, en ligne sur : <http://tinyurl.com/mm100923>.



5. UNE HORLOGE OPTIQUE À ATOMES DE STRONTIUM refroidis par laser en cours de développement par l'équipe de Pierre Lemonde au Laboratoire LNE-SYRTE de l'Observatoire de Paris. La fluorescence bleue des atomes de strontium est visible au centre de l'enceinte à vide. Ce type d'horloge est l'un des plus prometteurs pour atteindre une incertitude en fréquence de l'ordre de 10^{-18} .

Le potentiel gravitationnel est une grandeur physique qui traduit l'attraction qu'exerce une masse (en l'occurrence la Terre) sur toute autre masse. La force de pesanteur associée à ce potentiel dépend des deux masses et de la distance les séparant. Supposons que ces deux horloges soient identiques, au repos, et leur fréquences comparées à distance par la mission ACES ou, pour des distances plus faibles, par fibre optique. Leur écart de fréquence sera directement imputable à leur différence de potentiel gravitationnel.

Cette nouvelle méthode de géodésie pourra être comparée à celles utilisées actuellement pour déterminer le géoïde terrestre, surface où le potentiel gravitationnel est égal en tout point et qui décrit le mieux le champ gravitationnel de la Terre. Les méthodes actuelles reposent sur des missions spatiales ou des méthodes de nivellement terrestres. La mission ACES vise à montrer que ce nouveau type de géodésie relativiste est possible avec une sensibilité en distance verticale de l'ordre de dix centimètres.

ACES s'appuiera sur les derniers développements d'horloges optiques, telles celles mises au point par l'équipe de David Wineland au NIST, l'Institut américain des étalons et de la technologie, à Boulder. Cette équipe vient de montrer que la sensibilité des horloges optiques actuelles est telle que l'effet Einstein peut être détecté

sur une distance de seulement 30 centimètres ! (Pour transformer cette démonstration de principe en test de la relativité, il faudra bien sûr augmenter cette distance à bien plus grande échelle en envoyant ces nouvelles horloges dans l'espace ; plusieurs propositions dans ce sens pour prendre le relais de la mission ACES/PHARAO à l'horizon 2022 sont en cours.)

Si l'on extrapole les performances des horloges actuelles dans dix ans, les horloges optiques devraient atteindre une stabilité de fréquence de 10^{-18} , soit l'équivalent de un centimètre de décalage gravitationnel. À cette échelle, le potentiel terrestre n'est plus du tout stable ; il varie selon l'état des marées océaniques, la pression atmosphérique, les vents et le niveau de l'eau dans les nappes phréatiques. Ainsi, si les horloges deviennent un nouveau type de détecteur géodésique, on peut craindre que ces fluctuations du potentiel terrestre ne limitent la qualité de la mesure du temps et de ses applications.

Une solution possible sera d'installer dans l'espace une ou plusieurs horloges ultrastables de façon à s'affranchir de ces fluctuations, dont l'influence décroît très vite lorsqu'on s'éloigne de la surface terrestre.

Une seconde classe d'applications repose sur l'utilisation du récepteur GPS/GALILEO placé sur la plateforme ACES pour étudier l'atmosphère terrestre.

Lorsqu'ils apparaissent ou disparaissent au-dessus de l'horizon vu de la Station spatiale internationale, les signaux émis par les satellites du système GPS sont perturbés par la vapeur d'eau de l'atmosphère qu'ils traversent. De même, ils sont affectés par les différences de température en fonction de l'altitude. Les météorologues utilisent ces signaux pour reconstituer une carte des zones nuageuses et les profils de température de l'atmosphère. Une autre direction de recherche est l'exploitation de la réflexion des signaux GPS sur la surface de la mer, qui donne accès à la hauteur des vagues et à leur direction.

L'avenir de la mesure du temps

La mission spatiale ACES aborde la dernière phase de réalisation avant son lancement vers la Station spatiale internationale. Les modèles d'ingénierie des instruments ont été réalisés et testés durant les années 2008-2010. L'horloge PHARAO et les autres instruments de vol sont en cours de fabrication par les industriels. Ils seront assemblés et testés au centre spatial du CNES à Toulouse avant d'être acheminés vers Friedrichshafen, en Allemagne, où l'intégration globale sur la plateforme ACES sera réalisée. Le lancement dans l'espace sera réalisé par une fusée japonaise dans la seconde moitié de 2013 pour une durée de mission de 18 mois à 3 ans. Les équipes d'ingénieurs et de scientifiques préparent maintenant les opérations en vol, l'acquisition des données et leur exploitation.

Jusqu'où les horloges atomiques pourront-elles progresser avant qu'une nouvelle technologie ne vienne les surpasser ? Après 45 ans de bons et loyaux services, la définition actuelle de la seconde fondée sur l'atome de césium est aujourd'hui dépassée d'un facteur 20 par les horloges optiques. Il faudra donc changer la définition de la seconde du Système international. Les atomes candidats sont nombreux – strontium (voir la figure 5), ytterbium, mercure, aluminium... – et les travaux en laboratoire explorent plusieurs pistes pour atteindre des incertitudes en fréquence inférieures à 10^{-18} , voire 10^{-19} . Gageons que de nouvelles applications scientifiques et de nouvelles idées pour mesurer le temps de façon de plus en plus précise verront le jour dans les prochaines années ! ■



ÉDITIONS JACQUES GABAY

151 bis, rue Saint-Jacques - 75005 Paris (France)
Tél. : +33 (0)1 43 54 64 64 - Fax : +33 (0)1 43 54 87 00
E-mail : infos@gabay.com

ACADÉMIE FRANÇAISE
GRAND PRIX DU RAYONNEMENT
DE LA LANGUE FRANÇAISE
JACQUES GABAY
MÉDAILLE DE VERMEIL

www.gabay.com

TARIF 2011



Louis BACHELIER
1870-1946



Émile BOREL
1871-1956



Élie CARTAN
1869-1951

Préfixe ISBN
978-2-87647

- 073-6 ABEL : Œuvres complètes
+ BJERKNES : Abel. Sa vie et son action scientifique
(2 titres en 2 vol.) 167 €
- 064-4 d'ALEMBERT : Traité de Dynamique 39 €
- 336-2 N d'ALEMBERT : Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides... 82 €
- 060-2 AMPÈRE : Théorie mathématique des phénomènes
électro-dynamiques. 35 €
- 326-3 AMPÈRE : Considérations sur la théorie mathématique du jeu. 25 €
- 310-2 N ANDRADE : Leçons de Mécanique physique. 72 €
- 010-1 o APPELL : Traité de Mécanique rationnelle (6 vol. en 3) 197 €
- 089-7 ARTIN : Algèbre géométrique 35 €
- 129-0 BACHELIER : Théorie de la spéculation
+ Théorie mathématique du jeu (2 titres en 1 vol.) 27 €
- 090-3 BACHELIER : Calcul des probabilités 74 €
- 147-4 BACHELIER : Le jeu, la chance et le hasard 34 €
- 124-5 BAIRE : Leçons sur les fonctions discontinues 17 €
- 099-6 BAIRE : Théorie des nombres irrationnels,
des limites et de la continuité 13 €
- 228-0 BALL : Histoire des mathématiques (2 vol.) 116 €
- 140-5 o BALL : Récréations mathématiques (3 vol. en 1) 93 €
- 148-1 o BANACH : Théorie des opérations linéaires 30 €
- 067-5 BARBARIN : La géométrie non euclidienne 28 €
- 040-8 BAUER : Théorie des groupes et ses applications
à la physique quantique 28 €
- 279-2 BECKER : Théorie des électrons 69 €
- 331-7 N BERNOULLI Jacques : L'Art de conjecturer, Partie I
contient
HUYGENS : Traité de la manière de raisonner
dans les jeux de hasard 40 €
- 128-3 BERTRAND : Calcul des probabilités 60 €
- 290-7 BERTRAND : Traité de calcul différentiel et de calcul intégral
(2 vol.) 195 €
- 153-5 BOHR : La théorie atomique et la description
des phénomènes 21 €
- 044-6 o BOLL : La chance et les jeux de hasard. 37 €
- 004-0 BOLTZMANN : Leçons sur la théorie des gaz (2 vol. en 1) ... 49 €
- 086-6 BOREL : Leçons sur la théorie des fonctions 54 €
- 009-5 BOREL : Leçons sur les séries divergentes 32 €
- 340-9 BOREL : Valeur pratique et philosophie des probabilités 39 €
- 337-9 BOREL - CHÉRON : Théorie mathématique du bridge 69 €
- 339-3 BOREL - VILLE : Applications de la théorie des probabilités
aux jeux de hasard. 33 €
- 149-8 o BOREVITCH - CHAFAREVITCH : Théorie des nombres. 50 €
- 230-3 BORN : La Théorie de la Relativité d'Einstein
et ses bases physiques 60 €

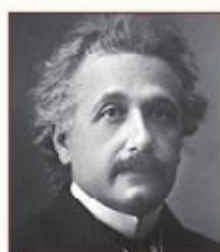
N = Nouveauté

- 084-2 o BOUTROUX : L'idéal scientifique des mathématiciens 34 €
- 317-1 N BOUTROUX : Les principes de l'analyse mathématique
(2 vol.) 164 €
- 150-4 o BRAHY : Exercices méthodiques de calcul différentiel
et intégral (2 vol. en 1) 58 €
- 003-3 BRILLOUIN : Les tenseurs en mécanique et en élasticité 37 €
- 036-1 BRILLOUIN : La science et la théorie de l'information 38 €
- 229-7 de BROGLIE : Éléments de théorie des quanta
et de mécanique ondulatoire. 54 €
- 041-5 de BROGLIE : Ondes et mouvements 24 €
- 062-0 CANTOR : Sur les fondements de la théorie des ensembles
transfinis 24 €
- 284-6 CARNOT Lazare : Réflexions sur la métaphysique
du calcul infinitésimal 45 €
- 069-9 CARNOT Sadi : Réflexions sur la puissance motrice du feu .. 25 €
- 008-8 CARTAN : Leçons sur la géométrie des espaces de Riemann .. 60 €
- 015-6 o CARTAN : Leçons sur la géométrie projective complexe
+ La théorie des groupes finis et continus
et la géométrie différentielle
+ Leçons sur la théorie des espaces à connexion projective
(3 titres en 1 vol.) 69 €
- 289-1 CATALAN : Traité élémentaire des séries 36 €
- 319-5 N CATALAN : Mélanges mathématiques (3 vol.) 180 €
- 053-8 CAUCHY : Analyse algébrique 68 €
- 057-6 CHASLES : Aperçu historique des méthodes en géométrie ... 68 €
- 058-3 CHASLES : La dualité et l'homographie 42 €
- 257-0 CHASLES : Traité de Géométrie supérieure 96 €
- 282-2 CHASLES : Traité des sections coniques 78 €
- 258-7 CHASLES : Les trois livres de Porismes d'Euclide 63 €
- 259-4 CHASLES : Rapport sur les Progrès de la Géométrie 69 €
- 260-0 CHAZY : La Théorie de la Relativité et la Mécanique céleste
(2 vol.) 99 €
- 273-0 CLAIRAUT : Éléments de géométrie 54 €
- 283-9 CLAPEYRON : Mémoire sur la puissance motrice
de la chaleur 18 €
- 079-8 o CLAUSIUS : Théorie mécanique de la chaleur (2 vol. en 1) .. 53 €
- COMMISSAIRE - CAGNAC : Cours de Mathématiques
Spéciales
- 201-3 I. I, Éléments d'algèbre et de géométrie analytique 72 €
- 202-0 I. II, Éléments d'analyse. Applications géométriques 58 €
- 203-7 I. III, Calcul intégral. Courbes et surfaces du second ordre ... 71 €
- 081-1 CORIOLIS : Théorie mathématique des effets du jeu de billard
+ Sur le principe des forces vives dans les mouvements relatifs
des machines
+ Sur les équations du mouvement relatif des systèmes
de corps (3 titres en 1 vol.) 60 €

o = oblong



Jean DIEUDONNÉ
1906-1992



Albert EINSTEIN
1879-1955



Évariste GALOIS
1811-1832

301-0	COSSERAT E. et F. : Théorie des corps déformables	40 €
134-4	COXETER - GREITZER : Redécouvrons la géométrie	35 €
016-3	DARBOUX : Leçons sur la théorie générale des surfaces + Leçons sur les systèmes orthogonaux et les coordonnées curvilignes + Principes de géométrie analytique (3 titres en 3 vol.)	227 €
222-8	DAUMAS : Les instruments scientifiques aux XVII ^e et XVIII ^e siècles	102 €
	DELAMBRE : Histoire de l'Astronomie	
250-1	Histoire de l'Astronomie ancienne (2 vol.)	190 €
251-8	Histoire de l'Astronomie du moyen âge	110 €
252-5	Histoire de l'Astronomie moderne (2 vol.)	235 €
253-2	Histoire de l'Astronomie au XVIII ^e siècle	125 €
346-1	N DELTHEIL - CAIRE : Géométrie	54 €
347-8	N DELTHEIL - CAIRE : Compléments de géométrie	72 €
324-9	N DEMARTRES : Cours de géométrie infinitésimale	69 €
307-2	DENJOY : Mémoire sur la dérivation et son calcul inverse	69 €
019-4	DESCARTES : La Géométrie	20 €
210-5	DIEUDONNÉ : Panorama des mathématiques pures. Le choix bourbachique	56 €
	DIEUDONNÉ : Éléments d'analyse	
211-2	t. I, Fondements de l'analyse moderne	62 €
212-9	t. II, Éléments d'analyse	65 €
213-6	t. III, Éléments d'analyse	61 €
214-3	t. IV, Éléments d'analyse	63 €
215-0	t. V, Groupes de Lie	46 €
216-7	t. VI, Analyse harmonique	45 €
217-4	t. VII, Équations fonctionnelles linéaires - I : Opérateurs pseudo-différentiels	54 €
218-1	t. VIII, Équations fonctionnelles linéaires - II : Problèmes aux limites	57 €
219-8	t. IX, Topologie algébrique et topologie différentielle élémentaire	61 €
271-6	DINGELDEY - FABRY : Coniques + Systèmes de coniques	52 €
071-2	DIRAC : Les principes de la Mécanique quantique	60 €
012-5	DIXMIER : Les algèbres d'opérateurs dans l'espace hilbertien (Algèbres de von Neumann)	54 €
013-2	DIXMIER : Les C* algèbres et leurs représentations	57 €
014-9	DIXMIER : Algèbres enveloppantes	52 €
158-0	DU BOIS-REYMOND : Théorie générale des fonctions	23 €
156-6	DUGAC : Jean Dieudonné, mathématicien complet (Collection "Plus de Lumière")	30 €
025-5	DUGAS : Histoire de la Mécanique	87 €
254-9	DUHEM : Les Origines de la Statique (2 vol.) (Collection "Plus de Lumière")	135 €
200-6	DUHEM : Traité d'Énergétique ou de Thermodynamique générale (2 vol. en 1)	87 €
302-7	DU PASQUIER : Léonard Euler et ses amis + CONDORCET : Éloge d'Euler	38 €
160-3	DUPORCQ : Premiers principes de géométrie moderne	19 €
143-6	DUPUY : La vie d'Évariste Galois	10 €
341-6	EDDINGTON : Espace, Temps et Gravitation	69 €
276-1	EINSTEIN : Sur l'Électrodynamique des corps en mouvement (trad. M. Solovine)	15 €
249-5	EINSTEIN : La Théorie de la Relativité restreinte et généralisée (trad. J. Rouvière)	33 €
342-3	EINSTEIN : Les fondements de la Théorie de la Relativité générale + Théorie unitaire de la gravitation et de l'électricité + Sur la structure cosmologique de l'espace (3 titres en 1 vol)	21 €
277-8	EINSTEIN : Quatre conférences sur la Théorie de la Relativité (trad. M. Solovine)	21 €
275-4	EINSTEIN : Lettres à Maurice Solovine	45 €
155-9	o EINSTEIN : Sur l'Électrodynamique des corps en mouvement + L'Éther et la Théorie de la Relativité + La Géométrie et l'Expérience + Quatre conférences sur la Théorie de la Relativité + Sur le Problème cosmologique + Théorie relativiste du champ non symétrique + Théorie de la Gravitation généralisée (7 titres en 1 vol.)	34 €
151-1	o ENRIQUES : Leçons de géométrie projective	43 €
256-3	EUCLIDE : Les Œuvres d'Euclide, en grec, en latin et en français (F. Peyrard) (3 vol.)	261 €
291-4	EULER : Introduction à l'Analyse infinitésimale (2 vol.)	144 €
335-5	F. G.-M. (Frère Gabriel-Marie) : Éléments de géométrie	80 €
083-5	o F. G.-M. (Frère Gabriel-Marie) : Exercices de géométrie	89 €
170-2	o F. G.-M. (Frère Gabriel-Marie) : Géométrie descriptive - Éléments + Exercices (2 vol.)	133 €
168-9	o F. G.-M. (Frère Gabriel-Marie) : Trigonométrie - Éléments + Exercices (2 vol. en 1)	90 €
280-8	FERMAI : Précis des Œuvres mathématiques et de l'Arithmétique de Diophante	36 €
167-2	o FITZ-PATRICK : Exercices d'arithmétique	65 €
046-0	FOURIER : Théorie analytique de la chaleur	75 €
056-9	FRÉCHET : Les espaces abstraits	43 €
304-1	FRÉCHET - KY FAN : Introduction à la topologie combinatoire	24 €
020-0	GALOIS : Écrits et mémoires mathématiques (Bourgne - Azra)	87 €
052-1	GALOIS : Œuvres mathématiques (Liouville) + LIE : Influence de Galois (2 titres en 1 vol.)	17 €
137-5	GALOIS : Œuvres mathématiques (Picard) + Manuscrits (J. Tannery) (2 titres en 1 vol.)	31 €
135-1	GAMOW : Trente années qui ébranlèrent la physique	41 €
035-4	GANTMACHER : Théorie des matrices (2 vol en 1)	82 €
054-5	GAUSS : Recherches arithmétiques	64 €
332-4	GAUSS : Méthode des moindres carrés	38 €
293-8	GAUSS : Recherches générales sur les surfaces courbes + Représentation conforme (2 titres en 1 vol.)	27 €
327-0	GAUSS : Théorie du mouvement des corps célestes parcourant des sections coniques autour du soleil	72 €
206-8	GEORGE : Exercices et problèmes d'intégration	69 €
154-2	o GERLL - GIRARD : Les Olympiades internationales de mathématiques	16 €
123-8	GIBBS : Équilibre des systèmes chimiques	46 €
146-7	o GODEAUX : Les Géométries	23 €
032-3	o GOURSAT : Cours d'Analyse mathématique (3 vol.)	149 €
152-8	o GREENHILL : Les fonctions elliptiques et leurs applications	60 €
095-8	o GRIMAUX : Lavoisier, 1743-1794	45 €
038-5	HADAMARD : Leçons de géométrie élémentaire (2 vol.)	104 €
292-1	HADAMARD : Leçons sur le calcul des variations	81 €
297-6	HADAMARD : Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique + POINCARÉ : L'invention mathématique (2 titres en 1 vol.)	30 €
299-0	HADAMARD : Leçons sur la propagation des ondes et les équations de l'hydrodynamique	69 €
300-3	HADAMARD : Le problème de Cauchy et les équations aux dérivées partielles linéaires hyperboliques	84 €
126-9	HALMOS : Introduction à la théorie des ensembles	23 €
220-4	HALPHEN : Traité des fonctions elliptiques et de leurs applications (3 vol.)	205 €
131-3	HARDY : Divergent Series (en anglais)	58 €



Charles HERMITE
1822-1901



Joseph-Louis LAGRANGE
1736-1813



Pierre-Simon LAPLACE
1749-1827

080-4	HEISENBERG : Les principes physiques de la théorie des quanta	28 €
063-7	HELMHOLTZ : Optique physiologique (2 vol.)	149 €
074-3	HELMHOLTZ : Théorie physiologique de la musique	71 €
343-0	HERMITE : Cours d'Analyse de la Sorbonne	69 €
345-4	HERMITE : Cours d'Analyse de l'École Polytechnique	72 €
338-6	HERMITE - STIELTJES : Correspondance (2 vol.)	150 €
037-8	HILBERT : Sur les problèmes futurs des mathématiques (Les 23 Problèmes)	16 €
043-9	HILBERT : Théorie des corps de nombres algébriques	57 €
127-6	HILBERT : Les fondements de la géométrie	48 €
018-7	JORDAN : Cours d'Analyse de l'École Polytechnique (3 vol.)	135 €
021-7	JORDAN : Traité des substitutions et des équations algébriques	79 €
221-1	JOUFFRET : Traité élémentaire de géométrie à quatre dimensions + Mélanges de géométrie à quatre dimensions (2 titres en 1 vol.)	69 €
248-8	JOUGUET : Lectures de Mécanique (2 vol. en 1)	90 €
145-0	KAMKE : Théorie des ensembles	26 €
005-7	KLEENE : Logique mathématique	60 €
011-8	KLEIN : Le programme d'Erlangen	19 €
262-4	KNESER - ZERMELO - HAHN - LECAT : Calcul des variations	54 €
141-2	KURATOWSKI : Topologie I et II (2 vol. en 1)	90 €
087-3	LADRIÈRE : Les limitations internes des formalismes. Étude sur la signification du théorème de Gödel	65 €
051-4	LAGRANGE : Mécanique analytique (1 ^{re} éd., 1788)	64 €
	LAGRANGE : Œuvres	
237-2	t. III Mémoires de Berlin (VII à XXII) (2 vol.)	144 €
242-6	t. VIII Traité de la résolution des équations numériques de tous les degrés	72 €
243-3	t. IX Théorie des fonctions analytiques	75 €
244-0	t. X Leçons sur le calcul des fonctions	81 €
245-7	t. XI et XII Mécanique analytique (4 ^e éd.) (J. Bertrand et G. Darboux) (2 vol.)	162 €
246-4	t. XIII Correspondance inédite de Lagrange et d'Alembert	73 €
247-1	t. XIV Correspondance de Lagrange avec Condorcet, Laplace, Euler et divers savants	72 €
007-1	LALESKO : La géométrie du triangle	30 €
261-7	LAMÉ : Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides	61 €
286-0	LAMÉ : Examen des différentes méthodes employées pour résoudre les problèmes de géométrie	36 €
	LAPLACE : Œuvres	
234-1	t. I à V Traité de Mécanique céleste (5 vol.)	360 €
233-4	t. VI Exposition du Système du Monde	72 €
161-0	t. VII Théorie analytique des probabilités (2 vol.)	120 €
226-6	von LAUE : La Théorie de la Relativité (2 vol.)	113 €
159-7	LA VALLÉE POUSSIN : Intégrales de Lebesgue	21 €
227-3	LA VALLÉE POUSSIN : Cours d'Analyse infinitésimale (2 vol.)	140 €
096-5	LAVOISIER : Traité élémentaire de chimie (2 vol. en 1)	75 €
059-0	LEBESGUE : Leçons sur l'intégration et la recherche des fonctions primitives	49 €
022-4	LEBESGUE : Les coniques	28 €
002-6	LEBESGUE : Leçons sur les constructions géométriques	53 €
077-4	LEBOSSÉ - HÉMERY : Géométrie (classe de Mathématiques)	49 €
308-9	LEGENDRE : Théorie des nombres (2 vol.)	150 €
072-9	LEVI-CIVITA : Caractéristiques des systèmes différentiels et propagation des ondes	21 €
091-0	LÉVY : Processus stochastiques et mouvement brownien	43 €
207-5	LÉVY : Théorie de l'addition des variables aléatoires	60 €
231-0	LÉVY : Calcul des probabilités	60 €
039-2	LIAPOUNOFF : Problème général de la stabilité du mouvement	35 €
281-5	LICHNEROWICZ : Éléments de calcul tensoriel	36 €
296-9	LICHNEROWICZ : Théories relativistes de la gravitation et de l'électromagnétisme	60 €
298-3	LICHNEROWICZ : Algèbre et analyse linéaires	60 €
060-6	LINDELÖF : Le calcul des résidus et ses applications à la théorie des fonctions	27 €
130-6	LORENTZ : The Theory of Electrons (en anglais)	31 €
042-2	LUCAS : Théorie des nombres	41 €
125-2	LUSIN : Leçons sur les ensembles analytiques et leurs applications + LEBESGUE : Sur les fonctions représentables analytiquement (2 titres en 1 vol.)	60 €
006-4	MACH : La Mécanique	50 €
138-2	MACLANE - BIRKHOFF : Algèbre + Solutions développées des exercices (5 vol. en 1)	102 €
157-3	MANDEL : Cours de Mécanique des milieux continus (2 vol. en 1)	75 €
045-3	MAXWELL : Traité d'Électricité et de Magnétisme (2 vol.)	150 €
205-1	MAXWELL : La Chaleur	38 €
088-0	MEYERSON : La déduction relativiste	38 €
163-4	MICHEL : Compléments de géométrie moderne + LEMAIRE : Exercices de géométrie moderne + SINGIER : Les correspondances algébriques (3 titres en 1 vol.)	58 €
	MOLK : Encyclopédie des Sciences Mathématiques Pures et Appliquées	
122-1	Collection complète, tomes I à VIII (22 vol.) ... port compris	768 €
	Volumes séparés - port en sus	
100-9	I-1 Arithmétique	58 €
101-6	I-2 Algèbre	57 €
102-3	I-3 Théorie des nombres	37 €
103-0	I-4 Calcul des probabilités. Théorie des erreurs	67 €
104-7	II-1 Fonctions de variables réelles	30 €
105-4	II-2 Fonctions de variables complexes	21 €
106-1	II-3 Équations différentielles ordinaires	28 €
107-8	II-4 Équations aux dérivées partielles	28 €
108-5	II-5 Développement en séries	37 €
109-2	II-6 Calcul des variations	34 €
110-8	III-1 Fondements de la géométrie. Géométrie générale	31 €
111-5	III-2 Géométrie descriptive. Géométrie élémentaire	24 €
112-2	III-3 Géométrie algébrique plane	35 €
113-9	III-4 Géométrie algébrique dans l'espace	27 €
114-6	IV-1 Mécanique : Généralités. Historique	34 €
115-3	IV-2 Mécanique générale	35 €
116-0	IV-5 Systèmes déformables	31 €
117-7	IV-6 Balistique. Hydraulique	30 €
118-4	V-1 Thermodynamique + V-2 Physique moléculaire + V-3 Principes physiques de l'Électricité + V-4 Principes physiques de l'Optique (4 vol. en 1)	37 €
119-1	VI-1 Géodésie + VI-2 Géophysique (2 vol. en 1)	41 €
120-7	VII-1 Astronomie sphérique	41 €
121-4	VIII Table des matières détaillée + Tribune publique (2 titres en 1 vol.)	41 €
065-1	MONGE : Géométrie descriptive	31 €
287-7	MONGE : Feuilles d'analyse appliquée à la géométrie	45 €
288-4	MONTUCLA : Histoire des mathématiques (4 vol.)	390 €
047-7	von NEUMANN : Les fondements mathématiques de la Mécanique quantique	48 €



Isaac NEWTON
1642-1727



Henri POINCARÉ
1854-1912



Vito VOLTERRA
1860-1940

070-5	NEWTON : Principes mathématiques de la philosophie naturelle (2 vol.)	144 €	082-8	RÉNYI : Calcul des probabilités	48 €
315-7	NEWTON : Arithmétique universelle (2 vol.)	125 €	076-7	RIEMANN : Œuvres mathématiques	65 €
344-7	NEWTON : Optique (trad. J.-P. Marat) (2 vol.)	96 €	078-1	RIESZ - SZ.-NAGY : Leçons d'analyse fonctionnelle	65 €
225-9	NIELSEN : Traité élémentaire des nombres de Bernoulli	62 €	133-7	RONCHI : Histoire de la lumière	50 €
144-3	NOGUES : Théorème de Fermat. Son histoire	19 €	136-8	ROUCHÉ - de COMBEROUSSE : Traité de géométrie (2 vol. en 1)	105 €
164-1	PAINLEVÉ : Les axiomes de la Mécanique	15 €	048-4	SCHRÖDINGER : Mémoires sur la Mécanique ondulatoire	42 €
085-9	PAPELIER : Exercices de géométrie moderne (9 vol. en 1)	90 €	031-6	SERRET : Cours d'Algèbre supérieure (2 vol.)	120 €
305-8	PAPELIER : Éléments de trigonométrie sphérique	36 €	092-7	SERRET : Traité de Trigonométrie rectiligne et sphérique	35 €
139-9	PARENT : Exercices de théorie des nombres	45 €	209-2	SIERPINSKI : Leçons sur les nombres transfinis	49 €
030-9	PETERSEN : Résolution des problèmes de constructions géométriques	20 €	142-9	SIERPINSKI : 250 problèmes de théorie élémentaire des nombres	43 €
075-0	PICARD : Traité d'Analyse (3 vol.)	135 €	097-2	SOURIAU : Calcul linéaire (2 vol. en 1)	42 €
278-5	PLANCK : Électromagnétisme	69 €	318-8	SOURIAU : Géométrie et Relativité	78 €
303-4	PLANCK : Leçons de thermodynamique	60 €	321-8	SOURIAU : Structure des systèmes dynamiques	69 €
093-4	POGGENDORFF : Histoire de la physique	82 €	264-8	STUDY - CARTAN : Nombres complexes	33 €
209-9	POINCARÉ : Leçons de Mécanique céleste (3 vol.)	178 €	306-5	TAIT : Traité élémentaire des quaternions (2 vol.)	120 €
165-8	POINCARÉ : Théorie mathématique de la lumière (2 vol. en 1)	64 €	316-4	TANNERY J. : Introduction à la théorie des fonctions d'une variable (2 vol.)	150 €
311-9	POINCARÉ : Leçons sur la théorie de l'élasticité	45 €	034-7	TANNERY P. : La géométrie grecque	27 €
312-6	POINCARÉ : Théorie analytique de la propagation de la chaleur	54 €	033-0	TANNERY P. : Pour l'histoire de la science hellène	63 €
313-3	POINCARÉ : Les oscillations électriques	57 €	182-5	TANNERY P. : Recherches sur l'histoire de l'astronomie ancienne	54 €
314-0	POINCARÉ : Cinématique et mécanismes	63 €		TANNERY P. : Mémoires scientifiques	
166-5	POINCARÉ : Thermodynamique	43 €	183-2	t. I Sciences exactes dans l'antiquité	67 €
028-6	POINCARÉ : Électricité et Optique	86 €	184-9	t. II Sciences exactes dans l'antiquité	78 €
285-3	POINCARÉ : Capillarité	42 €	185-6	t. III Sciences exactes dans l'antiquité	61 €
024-8	POINCARÉ : Théorie du potentiel newtonien	52 €	186-3	t. IV Sciences exactes chez les Byzantins	65 €
001-9	POINCARÉ : Calcul des probabilités	32 €	187-0	t. V Sciences exactes au moyen âge	58 €
023-1	POINCARÉ : La Mécanique nouvelle (Théorie de la Relativité)	25 €	188-7	t. VI Sciences modernes (Siècle de Format et Descartes)	87 €
026-2	POINCARÉ : Théorie des tourbillons	37 €	295-2	TARSKI : Introduction à la logique	50 €
027-9	POINCARÉ : Figures d'équilibre d'une masse fluide	37 €	255-6	TCHEBYCHEF : Œuvres (2 vol.)	215 €
098-9	POINCARÉ : Mémoire sur les courbes définies par une équation différentielle + Thèse + Note + BRIOT - BOUQUET : Trois Mémoires (6 titres en 1 vol.)	75 €	162-7	TEIXEIRA : Courbes spéciales remarquables planes et gauches (3 vol.)	181 €
	POINCARÉ : Œuvres		029-3	TISSERAND : Traité de Mécanique céleste (4 vol.)	288 €
171-9	t. I Équations différentielles	80 €	061-3	VALIRON : Cours d'Analyse mathématique. Équations fonctionnelles. Applications	71 €
172-6	t. II Fonctions fuchsienues	93 €	325-6	Van der WAALS : La continuité des états gazeux et liquide	54 €
173-3	t. III Équations différentielles. Théorie des fonctions	90 €	204-4	VERRIEST : Leçons sur la théorie des équations selon Galois + Évariste Galois et la théorie des équations algébriques (2 titres en 1 vol.)	56 €
174-0	t. IV Théorie des fonctions	96 €	224-2	VILLAT : Mécanique des fluides	45 €
175-7	t. V Algèbre. Arithmétique	81 €	320-1	VOLTERRA : Leçons sur les équations intégrales et les équations intégral-différentielles	38 €
176-4	t. VI Géométrie. Analysis situs (Topologie)	75 €	322-5	VOLTERRA : Leçons sur les fonctions de lignes	50 €
177-1	t. VII Masses fluides en rotation. Principes de Mécanique analytique. Problème des trois corps	87 €	066-8	VOLTERRA : Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie	35 €
178-8	t. VIII Mécanique céleste. Astronomie	105 €	323-2	VOLTERRA - PÉRÉS : Leçons sur la composition et les fonctions permutables	42 €
179-5	t. IX Physique mathématique	108 €	263-1	VOSS - E. et F. COSSERAT : Principes de la Mécanique rationnelle	45 €
180-1	t. X Physique mathématique	96 €			
181-8	t. XI Mémoires divers + Le Livre du Centenaire	102 €			
223-5	POISSON : Recherches sur la probabilité des jugements en matière criminelle et en matière civile	64 €			
049-1	POLYA : Comment poser et résoudre un problème	34 €			
294-5	POLYA : Les Mathématiques et le raisonnement "plausible"	60 €			
132-0	PONCELET : Traité des propriétés projectives des figures (2 vol.)	150 €			
169-6	PRIGOGINE : Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles	20 €			
309-6	REECH : Cours de Mécanique d'après la nature généralement flexible et élastique des corps	60 €			

o = oblong

Envoi dès réception du règlement (chèque ou carte bancaire)

POUR LA La sélection SCIENCE

Des livres scientifiques à la pointe de l'actualité



NOUVEAUTE

Le plus grand des hasards Surprises quantiques

Jean-François Dars et Anne Papillault

Comment pensent et à quoi rêvent les physiciens quantiques ? Soixante-cinq d'entre eux, couverts d'honneurs ou abordant leur thèse, racontent leurs hésitations, leurs angoisses, leurs efforts, leurs fatigues, leurs fureurs, leurs espoirs... Un témoignage précieux sur une science intrigante, accompagné de superbes photographies de ces chercheurs de l'extrême.

978-2-7011-5605-7 • 224 p. • 20,00 €



Les déchiffreurs Voyage en mathématiques

Jean-François Dars, Annick Lesne et Anne Papillault

Qui sont les mathématiciens ? Comment travaillent-ils ? Qu'est ce que l'intuition ? Autant de réponses que de questions dans cet ouvrage, où une cinquantaine de chercheurs, professeurs mondialement reconnus, médailles Fields ou jeunes thésards, proposent leur vision des mathématiques. Une plongée dans l'intimité de la création mathématique.

978-2-7011-4737-6 • 208 p. • 20,00 €



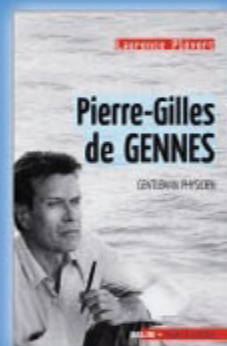
C. Ray et J.-C. Poizat

978-2-7011-4552-5 • 160 p. • 23,50 €



G. Pietryk

978-2-7011-3972-2 • 304 p. • 27,50 €



L. Piévert

978-2-7011-5228-8 • 368 p. • 23,00 €



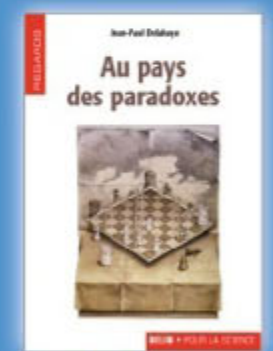
B. Valeur

978-2-7011-4751-2 • 160 p. • 23,90 €



J.-P. Delahaye

978-2-8424-1825-0 • 224 p. • 24,00 €



J.-P. Delahaye

978-2-8424-5090-8 • 192 p. • 24,00 €



D. Acheson

978-2-7011-4285-2 • 176 p. • 18,50 €



N. Gauvrit

978-2-7011-4622-5 • 240 p. • 25,00 €



Feuilletez les premières pages de notre sélection de livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.pourlascience.fr

Philippe Boulanger

Les paradoxes temporels

Ils résultent notamment de l'impossibilité de voyager dans le futur ou le passé, de l'irréversibilité du temps, et de sa division à l'infini.

Il est difficile de méditer sur le temps sans ressentir avec acuité les limites de notre intelligence, car le temps a ses caractéristiques évanescentes qui estompent notre compréhension. Nous ne mesurons pas ce que le temps est, mais ce qu'il fait devenir, comment notre environnement change « avec le temps ». Marie Bonaparte, arrière-petite nièce de l'empereur et l'une des premières psychanalystes françaises, exprimait cela dans un chiasme : « Ainsi, le temps me fait et je fais le temps. »

Longtemps les échelons du temps ont été astronomiques, la longueur du jour, du mois lunaire, d'une année. Aussi l'imagination concevait-elle difficilement des durées plus importantes. Il a fallu que l'on sache mesurer des désintégrations atomiques extrêmement lentes pour que l'on puisse évaluer des durées plus longues, des temps de l'ordre de l'ancienneté du monde. Notons qu'à mesure que l'on perfectionnait les mesures des temps longs, la Terre vieillissait : aujourd'hui les mesures convergent vers 4,55 milliards d'années. On peut penser que notre Terre ne vieillira plus beaucoup.

Le temps peut-il varier ? Comme nous mesurons les variations des choses par rapport au temps, avec quelles unités pour-

rions-nous mesurer les changements de l'écoulement du temps ? L'évolution du temps par rapport à lui-même suggère un écoulement invariable. Et si le temps variait, pourrions-nous le savoir ? Qu'advendrait-il si tout à coup une seconde durait le double ? Que remarquerions-nous ? Rien semble-t-il, selon les physiciens ! Notons que le doublement des longueurs, contrairement au doublement du temps, serait visible, car les aires seraient multipliées par quatre et les volumes (donc les masses) par huit : de nombreux monuments s'écrouleraient à cause de l'augmentation de la pression sur les structures. Et si le temps s'arrêtait et si l'Univers se figeait, le remarquerions-nous ? Non, car la mécanique quantique indique que notre seule observation ferait repartir le temps !

Les ouvrages de fiction ont rêvé que le temps pouvait changer pour certaines personnes comme la Belle au bois dormant ou Rip Van Winkle ; Dieu a arrêté le Soleil pour que Josué puisse battre les Amoriens.

Tout cela n'était que légendes et rêveries jusqu'à la relativité restreinte d'Einstein, il y a un siècle. Pour préserver le déroulement de la causalité, où la cause précède toujours l'effet, il fallait une vitesse limite et finie à tout phénomène (si la

vitesse était infinie, la cause coïnciderait avec l'effet et n'en pourrait se distinguer). La vitesse limite de propagation de la cause fut, à défaut de plus vraisemblable, la vitesse des particules de masse nulle, sans inertie : les photons. Mais alors on ne pouvait ajouter de vitesse à cette vitesse, et les rapports des longueurs et du temps devaient être modifiés en conséquence. Le temps s'écoulait plus lentement à l'approche de la vitesse de la lumière.

Ce qui introduisit le paradoxe des jumeaux, dit encore du voyageur de Langevin : un voyageur partant de la Terre et se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière vieillirait moins vite que son jumeau sédentaire et, à son retour sur Terre, retrouverait donc son frère beaucoup plus vieux que lui. Comme le jumeau sur Terre pourrait tenir le même raisonnement puisque, pour son jumeau voyageur, il se déplacerait à une vitesse proche de celle de la lumière, ils seraient, semblait-il, tous les deux plus jeunes que l'autre... Le paradoxe n'est que psychologique, car le jumeau qui a voyagé ne s'est pas déplacé à vitesse constante, de sorte que le calcul doit être modifié. Le jumeau qui aurait fait l'aller-retour en fusée serait vraiment plus jeune.