

MICHEL ABGRALL
 PASCAL BLONDÉ
 MICHEL LOURS
 MONIQUE PRODHOMME
 NOËL DIMARCO

SYRTE – Systèmes de Référence Temps-Espace
 Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, LNE

LES 80 ANS DE L'HORLOGE PARLANTE

Le 14 février 1933, l'horloge parlante installée à l'Observatoire de Paris diffusait, pour la première fois au monde, l'heure aux utilisateurs par téléphone. Aujourd'hui, l'horloge parlante continue à diffuser en permanence l'heure légale avec une précision de l'ordre de 50 ms sur le territoire métropolitain.



Horloge parlante de 1933.

ERNEST ESCLANGON ET LA PREMIÈRE HORLOGE PARLANTE

En 1929, lorsque Ernest Esclangon (1876-1954) est nommé directeur de l'Observatoire de Paris, les demandes « d'heure exacte » étaient si nombreuses à l'Observatoire qu'elles perturbaient les relations téléphoniques normales de l'établissement. Ernest Esclangon décida donc de rendre automatique le service horaire de l'Observatoire de Paris en utilisant la technique des « films parlants », qui avait fait des progrès considérables. A cette époque, des services automatiques de diffusion horaire avec des horloges à signaux acoustiques existaient déjà dans certains observatoires à l'étranger et aussi à l'observatoire de Strasbourg. L'heure était donnée toutes les minutes par un signal acoustique que suivaient immédiatement des signaux de timbre différent, dont le nombre donnait l'un le chif-

fre des dizaines, l'autre celui des unités de la minute correspondant au signal horaire initial. Mais l'interprétation des signaux était relativement compliquée et exigeait un apprentissage préalable.

La méthode choisie par Ernest Esclangon était simple et permettait de réaliser une distribution parlée et continue de l'heure sous une forme à la fois claire et précise. C'est l'entreprise Brillié (établissement français spécialisé dans la mécanique de précision et l'horlogerie) qui réalisa la première horloge parlante dans laquelle l'enregistrement photographique du son était porté par des bandes de papier analogues à celles employées en cinématographie parlante (trois millimètres de largeur) avec une vitesse de défilement de 45 centimètres par seconde. Les bandes étaient au nombre de 90 : 24 pour les heures, 60 pour les minutes, 6 pour les secondes (10, 20, 30, 40, « au quatrième top, il sera exactement »). Elles étaient collées sur un même

cylindre en aluminium de 30 cm de diamètre et de 60 cm de longueur qui tournait à la vitesse d'un tour en deux secondes. Trois reproducteurs de son par cellules photo-électriques correspondaient l'un aux heures, l'autre aux minutes, le troisième aux secondes. Ils étaient portés par des chariots qui se déplaçaient devant le cylindre à l'aide de cames et engrenages, et venaient se placer automatiquement devant les pistes. Le reproducteur des secondes se décalait toutes les dix secondes pour franchir l'intervalle séparant deux bandes consécutives et revenait à sa position initiale à chaque nouvelle minute. Le reproducteur des minutes se décalait d'un intervalle à chaque minute et revenait à sa position initiale après une heure. Enfin, le reproducteur des heures se décalait d'un intervalle toutes les heures ; il était ramené toutes les 24 heures à sa position de départ pour une nouvelle journée.

Petite biographie d'Ernest Esclangon

○ **17 mars 1876** : Naissance à Mison dans les Basses-Alpes.

○ **1895-1898** : Il intègre l'École normale supérieure et y obtient, très brillamment, l'agrégation de mathématiques.

○ **1899-1904** : Aide-astronome à l'observatoire de Bordeaux au service méridien (1899-1905), puis, comme astronome-adjoint (1905) au service équatorial. En plus de l'observation des planètes et comètes, il étudie la constitution des comètes.

○ **1904** : Il obtient le doctorat ès sciences mathématiques avec une thèse sur les fonctions quasi périodiques.

○ **1902-1919** : Ernest Esclangon est chargé du cours de mécanique rationnelle (1902-1905), puis maître de conférences (1905-1909) et professeur-adjoint (1909-1919), il enseigne le calcul différentiel et la géométrie infinitésimale, puis le cours de mathématiques générales à la faculté des sciences de l'université de Bordeaux.

○ **1914-1918** : Pendant la Grande Guerre, il est employé au polygone d'artillerie de Gâvres où il étudie les phénomènes sonores accompagnant les tirs d'artillerie pour le repérage des batteries ennemies et met en évidence l'onde balistique de fréquence élevée créée par un bolide à vitesse supersonique.

○ **1918-1929** : Directeur de l'observatoire de Strasbourg qu'il doit réorganiser après la guerre et l'occupation allemande.

○ **1919** : Invention de l'horloge à deux cadrans produisant le temps moyen à partir du temps sidéral. Le premier exemplaire est installé à Strasbourg en 1921. L'Observatoire de Paris et l'observatoire de Haute-Provence en seront également équipés.

○ **1929-1944** : Directeur de l'Observatoire de Paris et du Bureau international de l'heure, professeur d'astronomie physique à la faculté des sciences de Paris. Malgré la forte charge inhérente à la direction des deux sites, Paris et Meudon, il continue ses recherches

scientifiques sur des thèmes aussi variés que la mécanique céleste, l'instrumentation, les observations (Vénus, anneaux de Saturne...), la relativité... Il a participé à la recherche du site de l'observatoire de Haute-Provence.

○ **1932** : Il entre au Bureau des longitudes.

○ **1933** : Invention et mise en œuvre de l'horloge parlante.

○ C'est un scientifique mondialement reconnu comme le montrent les multiples prix et distinctions qui lui ont été attribués et les responsabilités internationales qui lui ont été confiées : élu à l'Académie des sciences en 1929, il en sera nommé président en 1942, présidence de la Société française de physique, présidence de l'UAI (Union astronomique internationale) en 1935. La SAF lui attribue le prestigieux prix Janssen en 1935.

○ Membre de la SAF, il en sera le président de 1933 à 1935. Vous pourrez lire sur le site : <http://adsabs.harvard.edu/full/1954LAAstr..68..201P> le texte de l'éloge prononcé à la SAF par Albert Perard, membre de l'Institut, et publié dans l'*Astronomie* de 1954.

Je citerai une phrase extraite de cet article : « Au

milieu de l'admiration qui l'entourait, il était resté un homme simple et essentiellement droit. Pour nous qui le rencontrions souvent, c'est un collègue toujours accueillant et souriant que nous avons perdu, c'est un ami sûr et fidèle que nous pleurons. »

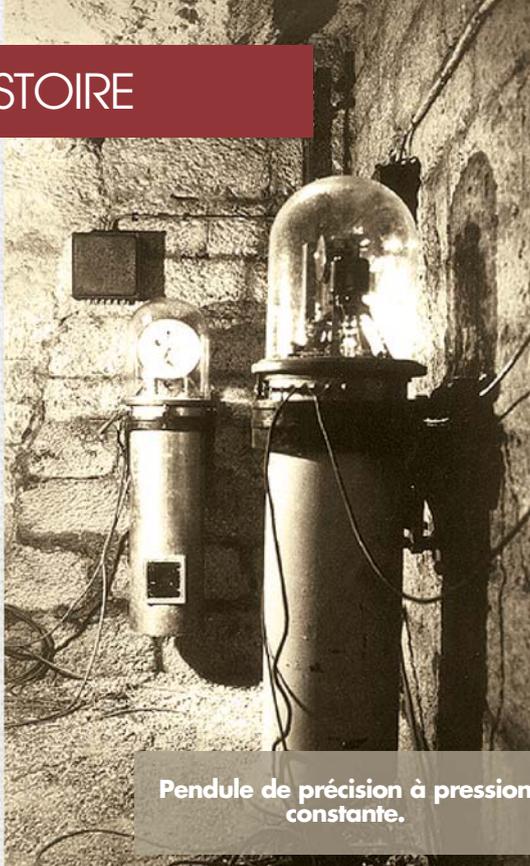
○ Il a publié plus de 230 articles scientifiques. Il est l'auteur de plusieurs livres parmi lesquels : *L'Acoustique des canons* 1920, *Dix leçons d'astronomie* 1934, *L'Horloge parlante de l'Observatoire de Paris*, édité par la SAF, *La Vie serait-elle possible à bord des satellites artificiels ?* chez Gauthier-Villars (1950), ainsi que de nombreux articles dans l'*Astronomie* (notamment celui décrivant l'horloge à deux cadrans, paru en 1935, volume 49, page 217.

○ **28 janvier 1954** : Décès à Eyrenville (Dordogne)



Ernest Esclangon.

Nicole Mein et Pascal Descamps ■



Pendule de précision à pression constante.

Dans cette horloge parlante, la partie mécanique était actionnée par un moteur électrique à courant continu synchronisé par une pendule de précision à balancier, à pression constante, qui se trouvait dans les caves de l'Observatoire. Cette horloge qui servait de garde-temps a été utilisée à l'Observatoire de Paris à partir de 1911. En 1934, une horloge à quartz l'a remplacée. Plus tard, une horloge à césium prendra le relais. Aujourd'hui, c'est un maser à hydrogène piloté par des horloges à atomes refroidis par laser qui fournit le temps de référence. Les tops n'étaient pas enregistrés sur le film : ils étaient donnés par la pendule synchronisant tout le dispositif mécanique. La précision du 4^e « top » était de l'ordre du trentième de seconde au départ de l'Observatoire de Paris et de l'ordre du dixième de seconde après transit dans les commutateurs téléphoniques. C'est ainsi que le 14 février 1933, après trois mois d'essais, fut installée à l'Observatoire de Paris la première horloge parlante au monde reliée au réseau téléphonique sous le numéro ODEon 84 00.

Auparavant, Ernest Esclangon en avait fait une présentation à l'Académie des sciences dans une note intitulée « Sur les horloges parlantes destinées à la distribution téléphonique de l'heure ». Il y soulignait que « la connaissance de l'heure exacte est devenue pour le public une nécessité de plus en plus impérieuse ».

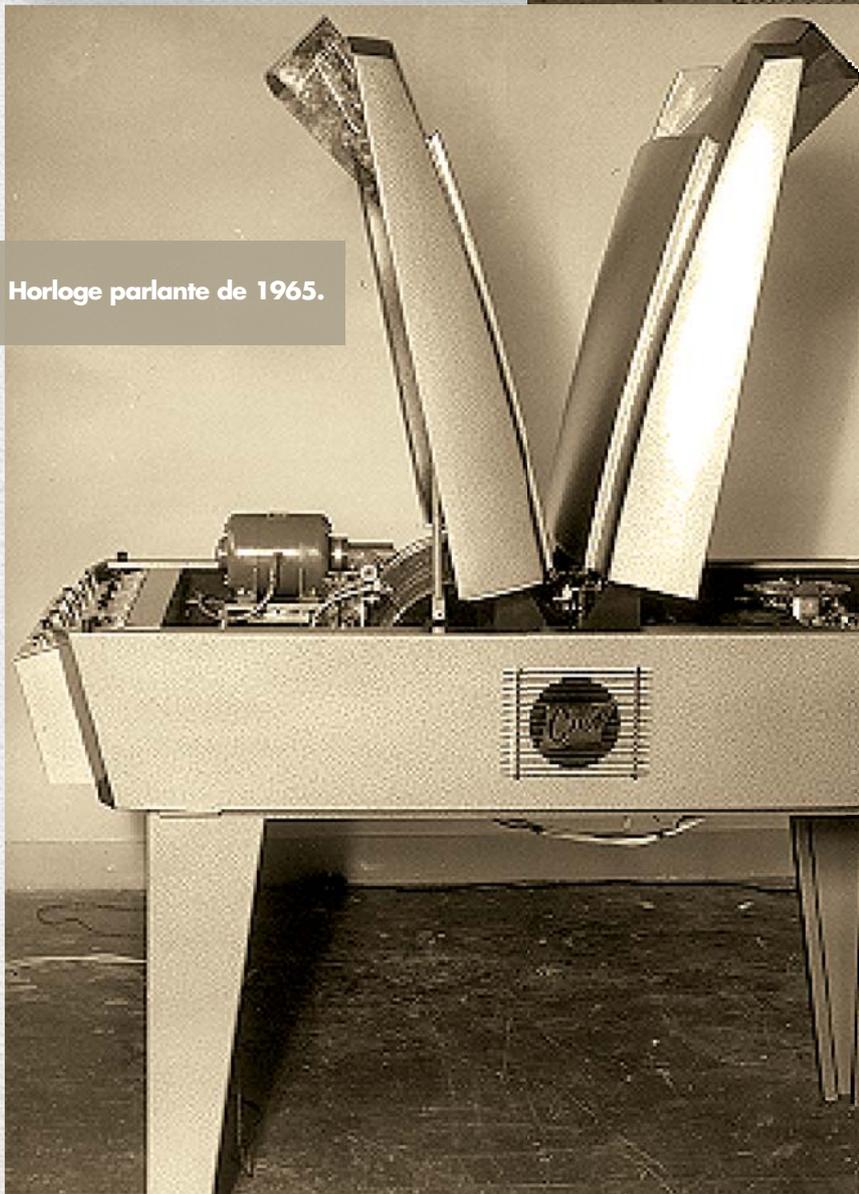
Le succès de l'horloge parlante fut considérable : les vingt lignes prévues pour ce service furent immédiatement saturées avec plus de 140 000 appels le premier jour. Seuls 20 000 abonnés reçurent satisfaction... Même après l'apaisement de la curiosité première, le nombre de communications resta élevé et il fallut ajouter dix lignes nouvelles.

La voix de cette première horloge parlante était celle de Marcel Laporte, speaker connu sous le nom de « radiolo ». Sa voix fut ainsi utilisée pour les annonces de l'horloge parlante de 1933 à 1965. En 1954, une tentative de remplacement de la voix masculine de l'horloge parlante par une voix féminine échoua. La mauvaise reproduction de la parole, due aux amplificateurs et aux écouteurs téléphoniques de l'époque dans le registre aigu, et surtout la privation de la voix masculine habituelle provoquèrent des protestations de la part des usagers et l'expérience ne dura qu'une journée.

LES VERSIONS SUIVANTES DE L'HORLOGE PARLANTE

Les principes mis au point par les ingénieurs de la maison Brillié ont été utilisés sur les différentes générations d'horloges parlantes jusqu'en 1991 avec cependant des modernisations progressives. Dans la version de 1965, les transistors remplacent les tubes électroniques. C'est le CNET (Centre national d'études des télécommunications, devenu ensuite France Télécom Recherche et Développement) qui met en service cette nouvelle horloge parlante. L'entraînement de la partie mécanique de l'horloge s'effectue alors à l'aide d'un moteur synchrone alimenté par un courant alternatif de fréquence 50 Hz obtenu à partir d'une horloge atomique à césium qui délivre également les « tops » de référence. Des bandes sonores de film 35 mm de cinéma professionnel, disposées sur un support réfléchissant et collées sur le cylindre tournant, remplacent les anciennes bandes sonores sur papier photographique.

La voix diffusée est celle d'Henri Thoillière, dont le nom est resté secret très longtemps (on parle alors d'un « postier anonyme »). Cette discrétion s'explique par le fait qu'un des candidats retenus précédemment pour prêter sa voix à l'horloge parlante avait demandé des droits très importants suite au calcul du nombre de fois où sa voix allait être diffusée.



Horloge parlante de 1965.

Les 80 ans de l'Horloge Parlante



Salle des horloges parlantes (avant 1991).



Dans la version de 1975, des photodiodes se substituent aux cellules photoélectriques et un dispositif de vérification de la position des têtes de lecture est ajouté. Le principe de la lecture optique est conservé mais l'utilisation de la bande sonore d'un film de cinéma 16 mm permet la réduction du diamètre du cylindre, qui est maintenant monté verticalement. Les trois têtes de lecture équipées de photodiodes se déplacent le long du cylindre sur des vis sans fin. Les pistes sonores de chaque groupe des heures, des minutes et des secondes sont montées sur le cylindre dans un ordre alterné, par exemple pour les heures : 0h, 23h, 1h, 22h, 2h, 21h... Les lectures s'effectuent en sautant une piste sur deux. Aux extrémités, le lecteur n'avance que d'une piste, inverse son sens de déplacement et poursuit alors ses lectures alternées continuant ainsi à égrener les annonces dans l'ordre chronologique. Le déplacement de chaque lecteur reste donc toujours de faible amplitude. Cela n'était pas le cas dans les versions précédentes où le lecteur arrivé au bout du cylindre devait revenir directement au début de celui-ci, ce qui engendrait parfois des erreurs dues à des « sauts » de piste intempestifs.

Horloge parlante de 1975.



L'horloge parlante actuelle.

L'HORLOGE PARLANTE ACTUELLE ET LA DIFFUSION DE L'HEURE LEGALE

La version actuellement en fonctionnement date de 1991. Développée à l'époque par le CNET, elle est aujourd'hui opérée par Orange et est accessible en appelant le 36 99.

C'est à nouveau un comédien anonyme qui prête sa voix à l'horloge, mais cette fois, elle est diffusée en alternance avec celle d'une femme (la comédienne Sylvie Behr). Les messages enregistrés sont stockés dans la mémoire d'un ordinateur sous la forme de phonèmes qui, regroupés, constituent le message diffusé.

Cette horloge informe de la date et ajoute « au 4^e top, il sera », sans le mot « exactement » qui a été enlevé par rapport aux messages diffusés par les générations précédentes.

L'heure légale en France, diffusée entre autres par l'horloge parlante, est réalisée à partir de l'horloge maîtresse du SYRTE à l'Observatoire de Paris qui construit UTC (OP), réalisation en temps réel de l'échelle de temps atomique UTC et qui n'en diffère aujourd'hui que de quelques nanoseconde

L'Horloge Parlante aujourd'hui...

Développée à l'époque par le CNET, elle est aujourd'hui gérée par Orange et est accessible en appelant le :

36 99

(milliardièmes de seconde). La différence entre l'heure légale et UTC (OP) est de une heure en hiver et de deux heures en été. A l'émission, l'exactitude de l'information horaire donnée par l'horloge parlante est meilleure que 0,5 ms. À cette valeur viennent s'ajouter les retards dus au temps de propagation dans les lignes téléphoniques et les retards éventuels des instruments de mesure utilisés.

À la réception, sur le territoire métropolitain, les mesures effectuées ont montré qu'un retard maximum de 20 ms à 30 ms est constaté sur des lignes analogiques fixes. Pour l'utilisateur, l'exactitude de l'information horaire transmise par l'horloge parlante sur le territoire métropolitain, à travers une ligne analogique fixe, est donc meilleure

que 50 ms. Cette exactitude se dégrade évidemment avec l'allongement de la distance. Le retard dû au temps de propagation dans des lignes numériques ou cellulaires peut être beaucoup plus important que dans des lignes analogiques, car un certain nombre d'appareils, dont le retard est non négligeable, intervient dans la distribution. Ce délai peut par ailleurs fluctuer d'un appel de l'horloge parlante à l'autre, pour la même raison. Les tops de l'horloge parlante peuvent être utilisés pour faire des mesures d'intervalles de temps (*i.e.* des mesures de fréquence). Dans ce cas, le retard lié au temps de propagation dans la ligne téléphonique n'intervient plus et l'incertitude de mesure est réduite, sous réserve d'utilisation d'instruments de mesure adéquats.



AUTRES MOYENS DE DIFFUSION DU TEMPS

D'autres moyens de diffusion sont quotidiennement utilisés pour transmettre les références de temps et de fréquences fonctionnant au SYRTE à l'Observatoire de Paris.

Le radiopilotage permet de synchroniser une horloge équipée d'un récepteur décodant un signal transporté par une onde radio. En France, ce signal est superposé à la porteuse de France Inter grandes ondes (162 kHz) qui est émis depuis l'émetteur de grande puissance situé à Allouis dans le Cher. Une partie des horloges des transports publics, des clochers, d'établissements, etc., est ainsi synchronisée par radiopilotage.

Le réseau internet (NTP – Network Time Protocole) est couramment utilisé pour synchroniser, depuis un serveur de référence, des ordinateurs avec des incertitudes de l'ordre de 1 ms ou mieux.

Enfin, les synchronisations de très hautes performances entre des horloges distantes utilisent aujourd'hui le système satellitaire GPS ou des satellites géostationnaires de télécommunications (méthode TWSTFT – Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer). Ces synchronisations, qui sont à la base de la construction des échelles de temps atomiques internationales, ont une précision de l'ordre de 1 ns (1 milliardième de seconde). Ces techniques satellitaires permettent aussi de comparer les fréquences d'horloges distantes avec une erreur inférieure à 10^{-15} en valeur relative.

Enfin, il faut noter que les nouvelles horloges atomiques optiques surpassent, avec leur exactitude de fréquence dans la gamme des 10^{-17} en valeur relative, les meilleures horloges à césium par plus d'un ordre de grandeur. Cette nouvelle génération d'horloges requiert des techniques de diffusion du temps et des fréquences bien plus performantes que celles citées ci-dessus. C'est la raison pour laquelle des méthodes innovantes de transfert par des liens laser cohérents (en propagation libre ou via des fibres optiques du réseau Internet scientifique RENATER) sont en cours de développement, avec des performances exceptionnelles déjà démontrées sur des liens de plusieurs centaines de kilomètres : synchronisation au niveau de 0,1 ns et transfert d'une fréquence avec une incertitude relative de 10^{-19} .

UTILISATION DE LA DIFFUSION DU TEMPS ET DES FREQUENCES

La construction de l'heure et sa diffusion est tout d'abord fondamentale pour s'assurer que toutes les heures locales sont les mêmes, ce qui répond au besoin de l'unification de l'heure en France qui date

de 1891. Avant cette date, en France, chaque ville avait sa propre heure définie par l'astronomie et en particulier par la position du Soleil dans le ciel.

Au-delà de disposer de l'heure précise dans la vie quotidienne, le besoin de dater précisément des opérations ou de synchroniser des réseaux à grande échelle est devenu critique aujourd'hui dans de nombreux secteurs d'activités : télécommunications, échanges de données, transactions bancaires, services de secours...

Les applications scientifiques sont aussi extrêmement variées et nombreuses, entre autres en astronomie/astrophysique (connaissance de la différence entre UTC et le temps UT1 lié à la rotation de la Terre, interférométrie à très longue base VLBI, datation des pulsars, navigation des sondes dans le système solaire...), en physique fondamentale (tests de la relativité générale, recherche d'une dérive des constantes fondamentales...), en géophysique (géodésie relativiste utilisant la mesure du décalage de fréquence entre deux horloges situées dans des potentiels de gravitation différents...).

Enfin, n'oublions pas que le lien serré entre l'espace et le temps se traduit concrètement par le fait que la définition du mètre dans le système international d'unités découle de celle de la seconde, ou que les meilleures techniques actuelles pour le positionnement et la détermination de distances reposent sur des mesures précises de temps (téléométrie laser, système GPS...). Ainsi, dans le système GPS, une erreur sur le transfert de temps de 1 ns se traduit par une erreur de positionnement de 30 cm, ce qui n'est certes pas critique pour connaître la position d'une automobile, mais n'est plus négligeable en géophysique pour l'analyse fine du mouvement des plaques tectoniques.

CONCLUSION

L'horloge parlante, qui aura 80 ans le 14 février 2013, aura vu de nombreuses améliorations techniques apportées dans la construction et la diffusion de l'information horaire sonore issue du signal délivré par une horloge de référence. Même si le besoin en précision de l'horloge parlante (50 ms) est toujours resté sensiblement le même, ces dernières décennies ont vu l'émergence de nouvelles applications qui requièrent des qualités de synchronisation au moins 10 millions de fois meilleures que celles accessibles avec l'horloge parlante. L'obtention d'un tel niveau de performance, qui n'a pas encore atteint ses limites, a été rendue possible d'une part par la mise en œuvre de techniques de transferts de temps par satellites ou par fibres optiques et, d'autre part, par le développement de nouveaux concepts d'horloges atomiques utilisant des atomes ou des ions refroidis par laser. ■