

# Résonances et oscillations: de l'atome au laser



Gaetano Mileti

*Laboratoire Temps - Fréquence (LTF)*

*Institut de Physique, Faculté des Sciences*

*Université de Neuchâtel, Suisse*



1) La mesure du temps à Neuchâtel  
et dans le monde



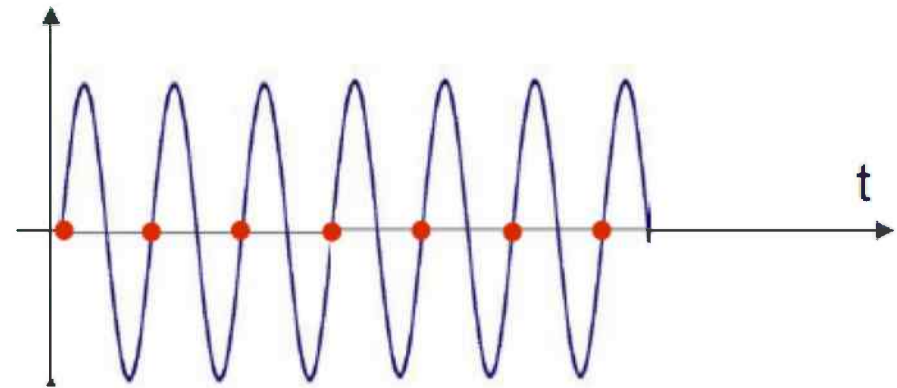
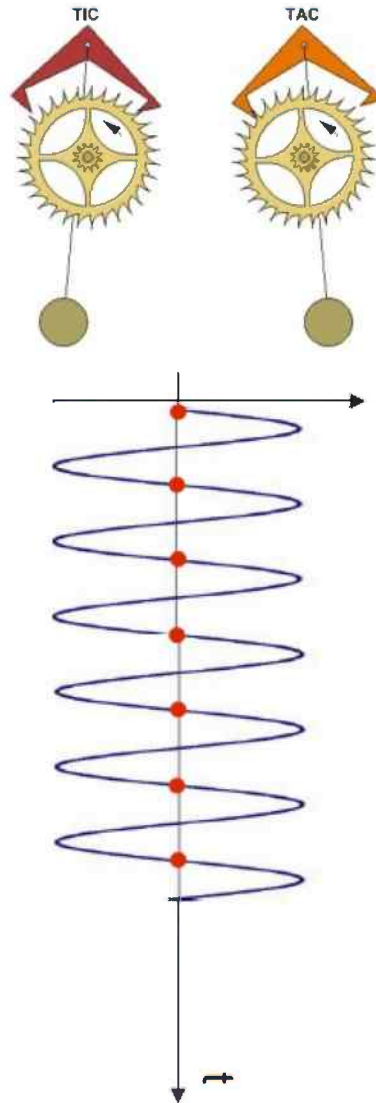
2) Horloges atomiques:  
principe et applications



3) Exemples des recherches en  
cours

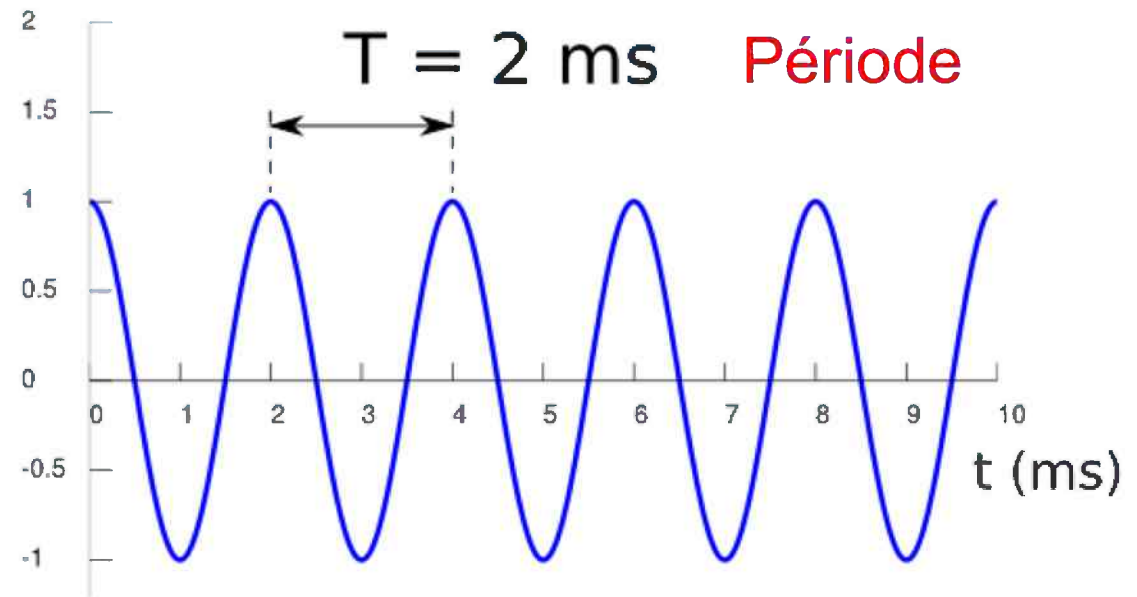


# 1) OSCILLATIONS ET MESURE DU TEMPS



# PÉRIODE ET FRÉQUENCE D'UN OSCILLATEUR

Oscillation  
Phénomène périodique



Fréquence

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.002} = 500 \text{ Hz}$$

# RECHERCHE ET MESURE DU TEMPS

## Métamorphoses de la mesure du temps



Rotation de la Terre



Laser



Horloges atomiques (1950)  
Maser à hydrogène,  
Jet au césium,  
Vapeur de rubidium

Horloges à quartz (1930)

Chronomètre de marine (1750)  
Harrison

Pendule de Huygens (1650)  
pendule

Horloges de tour (1300)  
balancier à verge et foliot

Précision  
en  
secondes  
par jour

10 ps

100 ps

10 ns

1 ms

1 s

10 s

Inexactitude /  
instabilité /  
incertitude  
relative

~ 1 nano-seconde  $10^{-14}$

~ 1 micro-seconde  $10^{-11}$

$10^{-8}$

$10^{-5}$

~ 15 minutes  $10^{-2}$  (1%)

-3000   -1500   -170   800   1300   1600   1700   1900   2000

# PREMIÈRES HORLOGES ATOMIQUES À NEUCHÂTEL

L'Express | vendredi, août 06, 1954 | 1

~ 10 micro-seconde  $10^{-10}$  **1954**

UN JOURNALISTE FRANÇAIS DANS NOTRE VILLE

## L'horloge atomique va naître à Neuchâtel

Grâce à nos savants, les hommes mesureront le temps avec encore plus d'exactitude

Le « Figaro littéraire » du 17 juillet a publié un fort intéressant article de M. Pierre de Latil, écrivain scientifique connu par son ouvrage sur « La cybernétique ». M. de Latil a fait le voyage de Neuchâtel, d'une part, pour admirer les automates Jaquet-Droz — que chacun connaît — et d'autre part, pour se renseigner sur la construction, au Laboratoire suisse de recherches horlogères, d'une horloge atomique — ce qui sera une révélation pour le profane de notre ville.

Fonds. Adeptes de la cybernétique, nous n'étions pas sans quelque dédain pour de tels jouets qui, réglés une fois pour toutes, n'ont aucun degré de liberté.

Mais si le « dessinateur » et l'« écrivain » n'ont de souplesse que dans la main, la joueuse de clavecin est, elle, d'une grâce absolument étonnante. Certaines de ses révérences sont véritablement féminines. Non, la came poussant un ergot relié à un levier ne pourra jamais rien donner de moins méca-

elles plus ni balanciers ni roues dentées. Elles sont électroniques. — Celle-ci, nous dit M. Quillet, ingénieur électronicien du laboratoire horloger, ne varie que d'un cent millièmes de seconde par jour. Et, comme le jour compte près de cent mille secondes, cela signifie que, sur la seconde, la précision est de l'ordre du dix milliardième. Une puissance moins dix, pour parler plus mathématiquement. Nous étions dans les sous-sols du laboratoire. L'horloge n'avait rien

L'Express | mardi, mars 18, 1958 | 6

**1958**

*Instrument d'une extrême précision*

## L'horloge moléculaire est née à Neuchâtel

Après son exposition au pavillon suisse de Bruxelles, elle fonctionnera dans notre observatoire

Depuis les temps les plus anciens, l'homme a mesuré le temps d'après la rotation de la terre sur son axe. De la durée du jour, il a déduit la seconde. A cette unité se rapportent encore toutes les mesures du temps de la science et de la technique. Or, il y a vingt ans environ, on a constaté que la terre ne constitue pas une horloge absolument exacte. En effet, elle subit des variations de marche de l'ordre du millième de seconde par jour.

cylindre des oscillations accompagnées d'une émission d'ondes radio. La fréquence de ces ondes est la même que la fréquence des oscillations des molécules, environ 24 milliards à la seconde. Ce dispositif, produisant des ondes radio à l'aida

L'Express | mercredi, juillet 15, 1959 | 20

**1959**

## Au Laboratoire suisse de recherches horlogères : d'intéressantes recherches

A l'occasion de son assemblée annuelle, tenue sous la présidence de M. Sydney de Coulon et en présence des représentants des organisations horlogères, le Laboratoire suisse de recherches horlogères (L.S.R.H.) de Neuchâtel, a rendu compte de ses activités.

Des crédits spéciaux ont permis notamment l'acquisition d'un microscope électronique, qui pourra également se transformer en une microsonde électronique d'une conception nouvelle, et la mise en chantier d'une horloge atomique à césium, qui viendra s'ajouter à l'horloge moléculaire à gaz d'ammoniac déjà en service depuis deux ans.

Le L.S.R.H. sera ainsi le seul laboratoire au monde à posséder ces deux types d'étalon de fréquence assurant une précision du cent-millième de seconde par jour.

**L'OBSERVATOIRE CANTONAL À LA POINTE DU PROGRÈS**

## La première horloge atomique au thallium jamais construite fonctionne au Mail

**1963**

**Autre innovation : la mise en service d'une chambre sous pression constante pour l'observation des chronomètres**

L'Observatoire de Neuchâtel doit sa réputation à son heure. Cette heure est actuellement parmi les meilleures du monde. Aujourd'hui, il « produit » une heure d'une précision — tenez-vous bien et réglez votre montre — de quelques dix-millionièmes de seconde par jour. Et cela grâce à sa nouvelle horloge atomique au thallium, qui est la première de ce genre à avoir jamais été construite et à fonctionner.

Créé il y a un peu plus de cent ans, notre Observatoire était conçu, à l'origine, comme un service public et non comme un Institut de recherche. Maintenant, il remplit cette double fonction, car la détermination de l'heure et sa conservation mobilisent les plus récentes applications de la physique moderne. Aujourd'hui, les horloges à quartz ont remplacé les horloges mécaniques à pendule. Ces dernières régulent leur marche sur celles des étoiles. Aujourd'hui, c'est la marche des étoiles qui est contrôlée par les horloges. Et à l'horloge à quartz a succédé l'horloge atomique.

**Record mondial de précision**

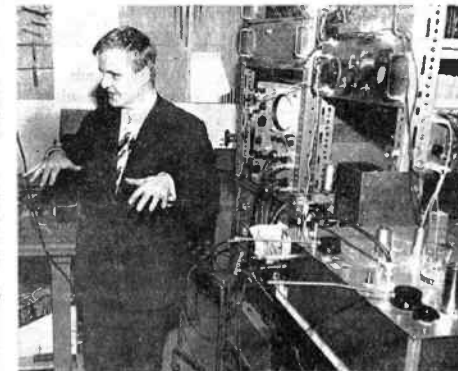
Les horloges atomiques, qui existent depuis environ six ans, utilisent les propriétés de certains atomes d'exclure à des fréquences très élevées et constantes. Ces vibrations peuvent être comparées aux oscillations du pendule régulant le mouvement de l'horloge. Mais ici, on est dans le domaine de la physique moderne et de l'électronique. Les horloges atomiques modernes sont pilotées généralement par les atomes de césium, de rubidium ou encore les molécules de gaz ammoniaque. Leur précision se situe au-dessus de 2 milliards de seconde par jour. Le nouvel élément utilisé dans l'horloge atomique de l'Observatoire, à savoir le

thallium, est le plus précis de tous. Ses vibrations sont réglées électriquement. L'Observatoire, qui a travaillé en collaboration avec le Laboratoire des recherches horlogères, démontre que, dans le champ de la recherche, il est à l'avant-garde.

**La pression atmosphérique jugulée**

Nous avons eu hier également le plaisir d'une autre nouvelle installation, celle-ci destinée au contrôle des chronomètres. Comme on le sait, une activité importante de l'Observatoire cantonal consiste dans l'observation des meilleurs chronomètres de l'industrie horlogère. L'observation de chaque chronomètre s'étend sur deux mois environ et comprend des mesures faites à plusieurs températures et dans plusieurs positions.

Jusqu'ici, un facteur non négligeable d'influence sur le marche des chronomètres restait inconnu, c'est l'influence des variations de la pression atmosphérique. En effet, une variation de la hauteur de la colonne de mercure de 1 mm peut produire une différence de marche de 1/100 de seconde par jour environ. Or, chez nous, entre le Neuchâtel et le régime des lacs, des variations de pression de plusieurs dizaines de mm de mercure sont fréquentes. Il en résulte des variations dans le marche des chronomètres, qui peuvent en égarer certains et en déprécier d'autres. Afin d'éviter



M. Jacques Bonanant présente la nouvelle horloge atomique de l'Observatoire de Neuchâtel.

(Photo A. Juvans - J.-P. Ballod.)

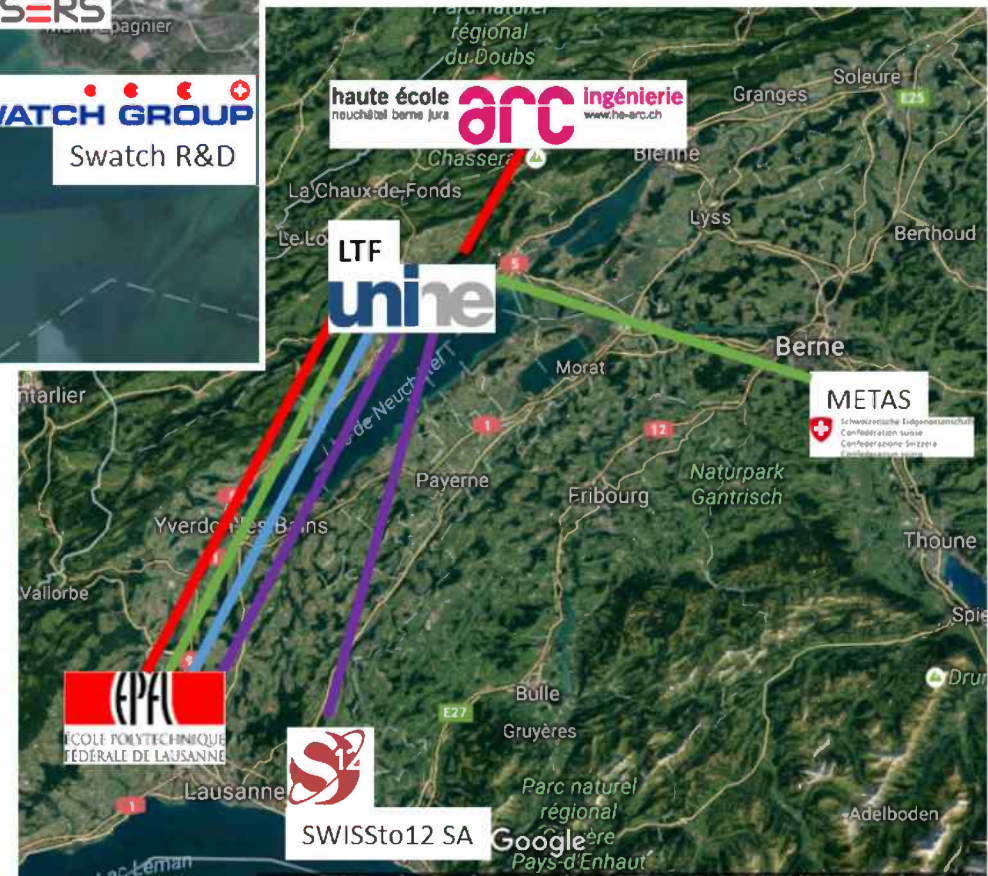
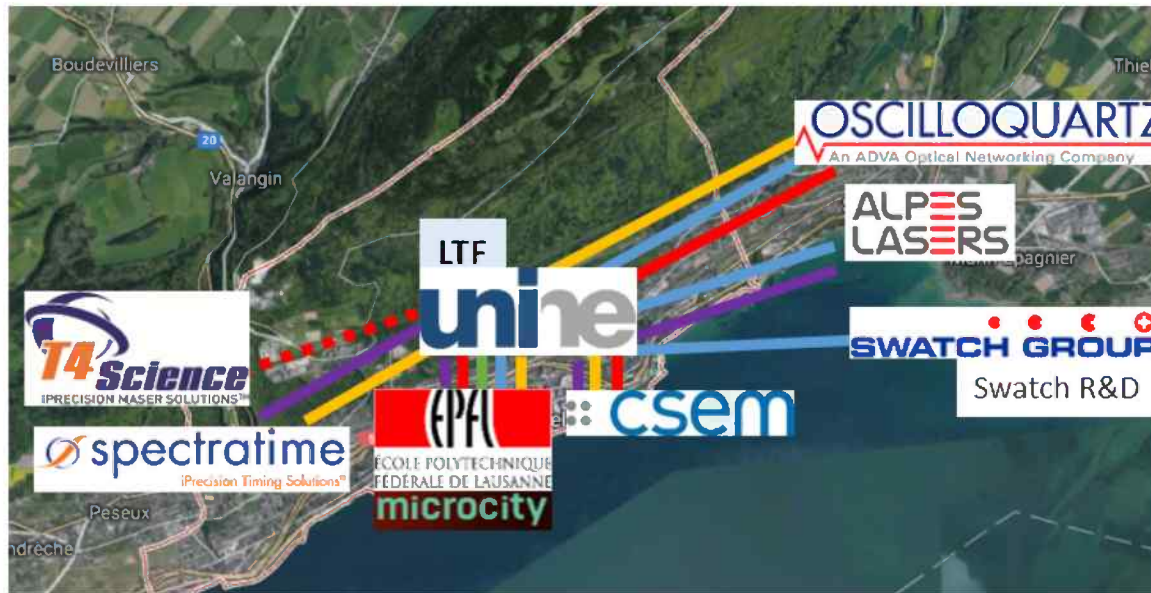
# EXPOSITION UNIVERSELLE DE 1958



Crédit:  
Johann  
Boillat

L'horloge universelle (ainsi que l'étalon moléculaire et l'horloge à quartz) dans la section horlogère

# RÉSEAU UNIQUE AU MONDE



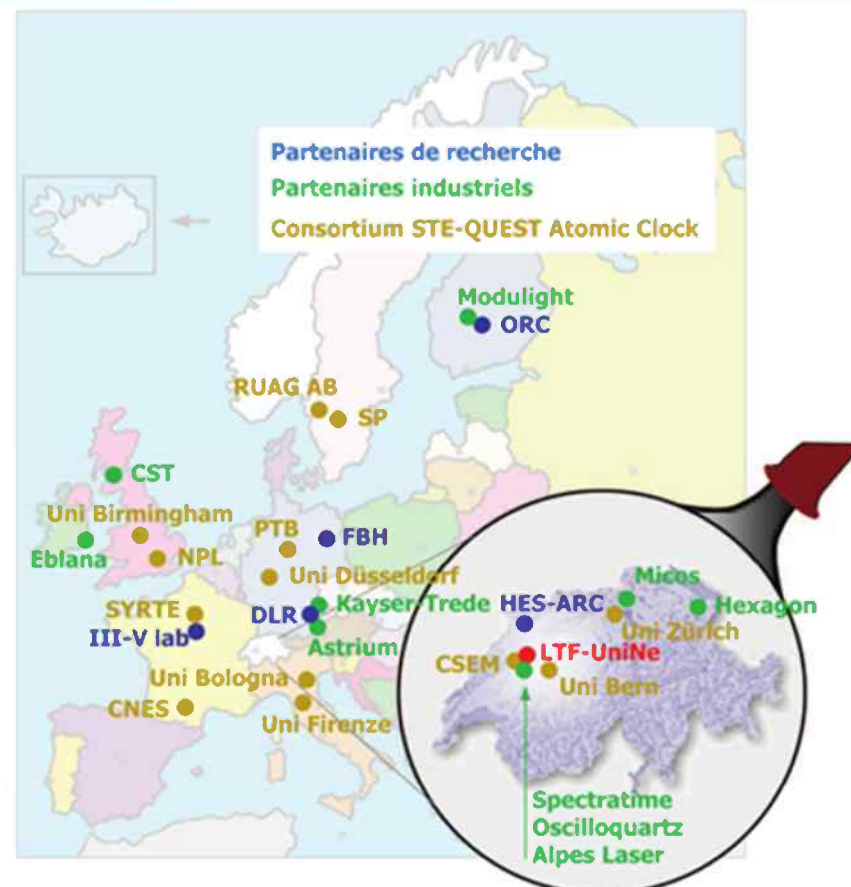


# COLLABORATIONS INTERNATIONALES

## Domaine des horloges compactes (haute-performance et miniature)



## Domaine des lasers stabilisés



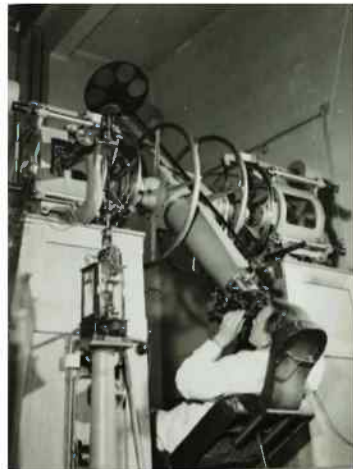
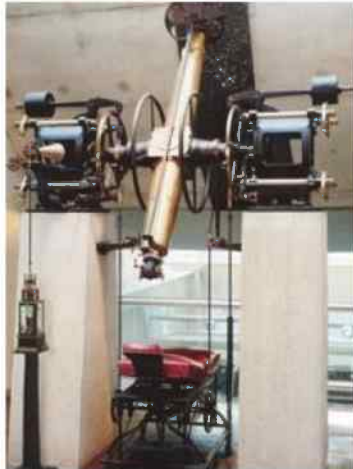
# LABORATOIRE TEMPS – FRÉQUENCE (LTF)

Fondé en 2007



Recherche, Formation et médiation scientifique

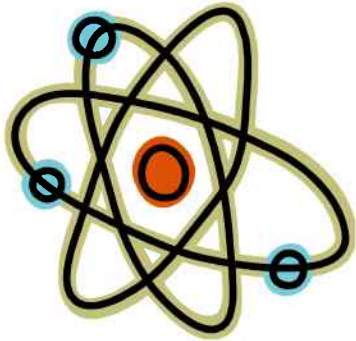
## Observatoire de Neuchâtel (1858 – 2007)



## Oscillateurs mécaniques (garde-temps)



# TEMPS ATOMIQUE – HORLOGES ATOMIQUES



Atome  
(nouvelle  
référence)

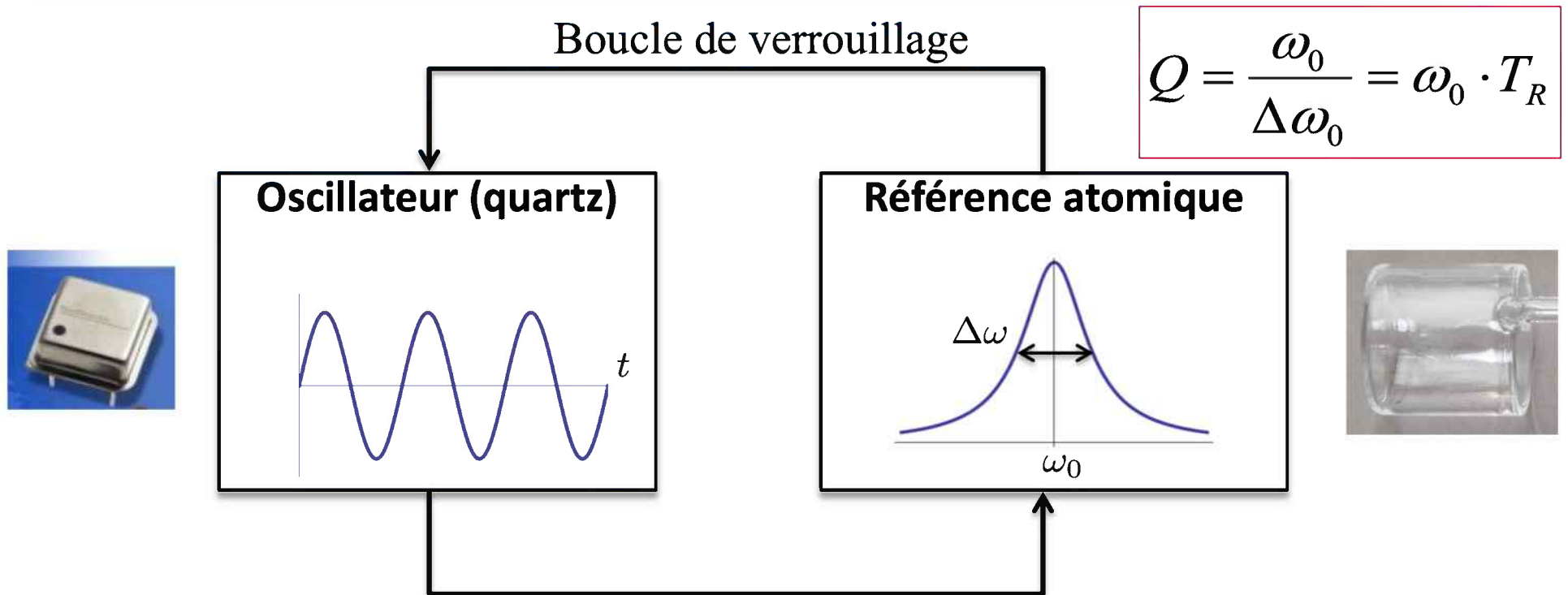
Observatoire de Neuchâtel (1858 – 2007)



Oscillateurs à quartz  
(nouveaux garde-temps)



## 2) PRINCIPE D'UNE HORLOGE ATOMIQUE



*L'utilisateur a besoin d'un signal stable à 5 / 10 MHz*

- Télécommunications
- Navigation
- Instrumentation
- Recherche fondamentale
- Etc.

Interrogation



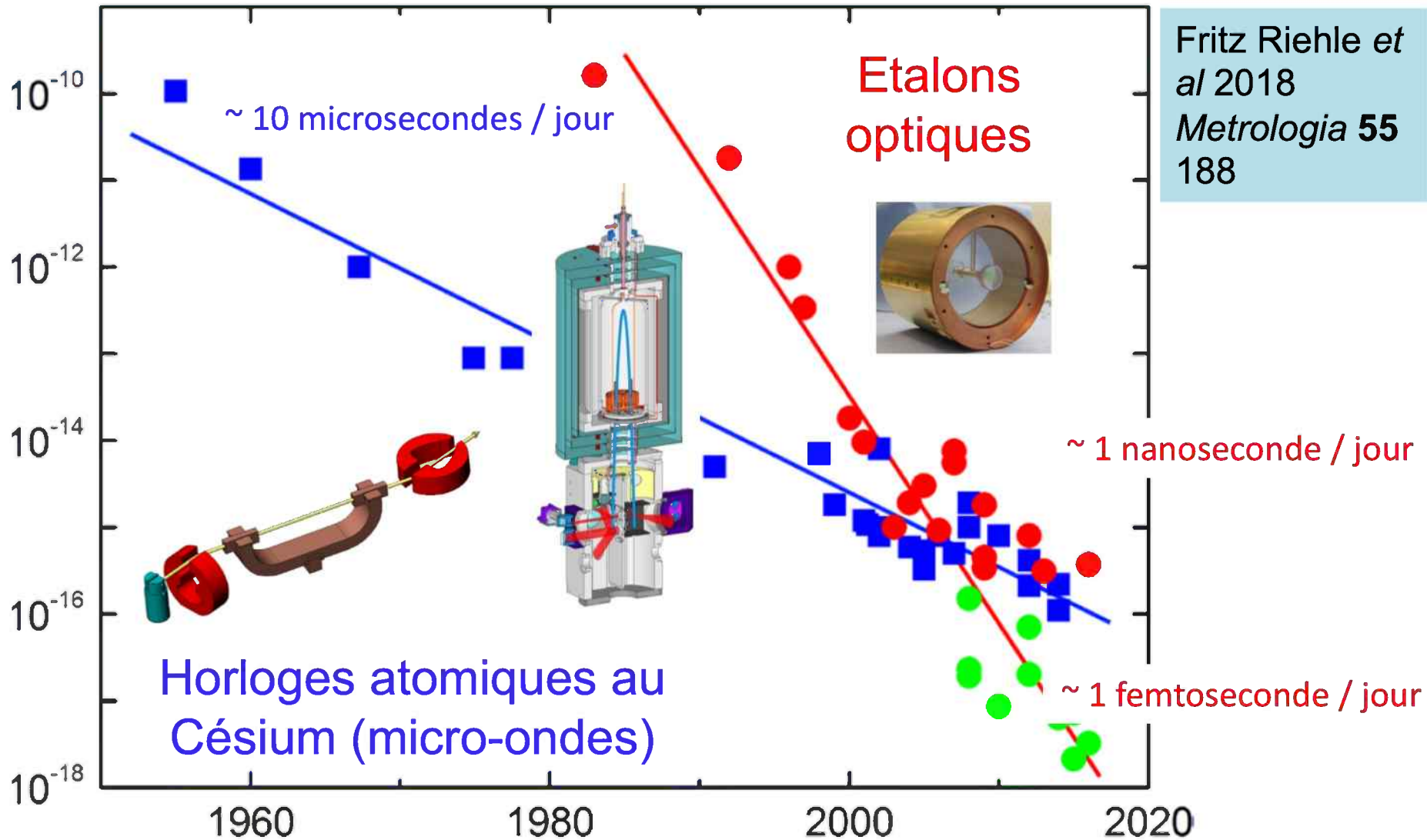
*“Résonance Magnétique”*

*(à la fréquence  $\omega_0$ , dans le domaine micro-onde ou optique)*

**Senseur “quantique”  
Technologie quantique**

# PRÉCISION DES HORLOGES ATOMIQUES

Exactitude / Stabilité relative

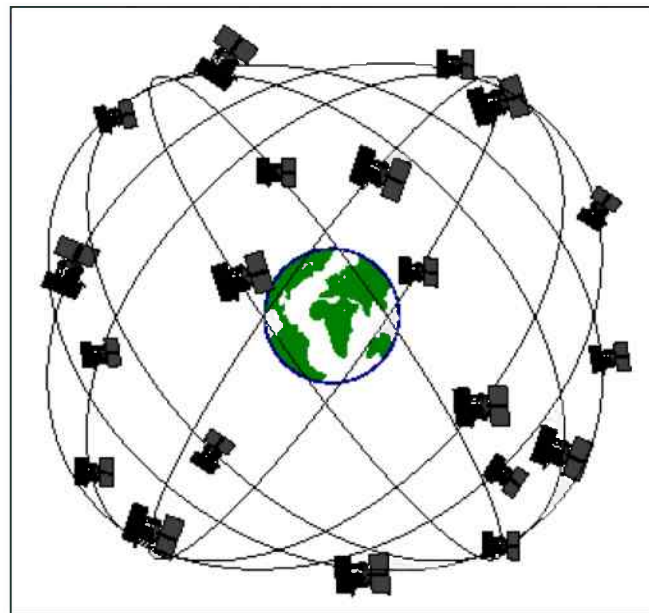


# APPLICATION 1: POSITIONNEMENT



Détermination de la longitude en mer:

**1 seconde**  
d'erreur  
~  
500 m d'erreur  
(à l'équateur)



Positionnement par satellite:

**1 nano seconde**  
d'erreur  
(0.000'000'001 s)  
~  
30 cm d'erreur



# APPLICATION 2: SYNCHRONISATION DE RÉSEAUX



Réseaux de télécommunication et de distribution d'énergie «intelligents»:

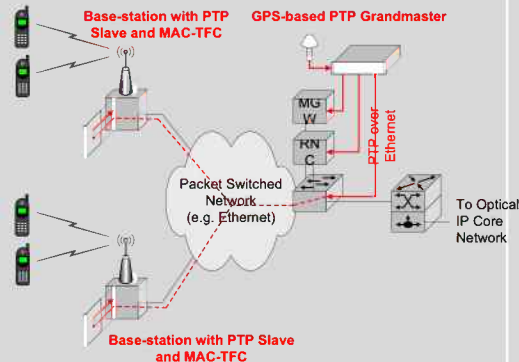
ont besoin d'une synchronisation à environ **1 microseconde**

(0.000'001 s)

## 4G LTE base stations:

Phase time synchronization for online TDD and MBSFN

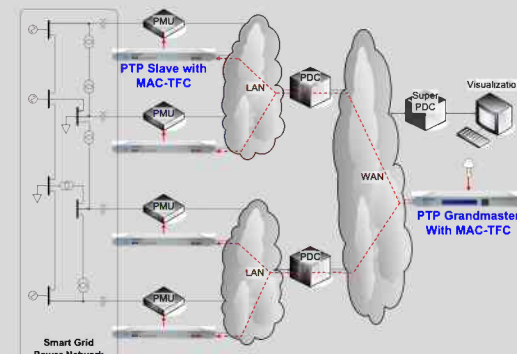
High jitter rejection  
Holdover >> 24 h



## POWER Smart Grid:

1 μsecond synch of Phase Measurement Units

Holdover >> 24 h



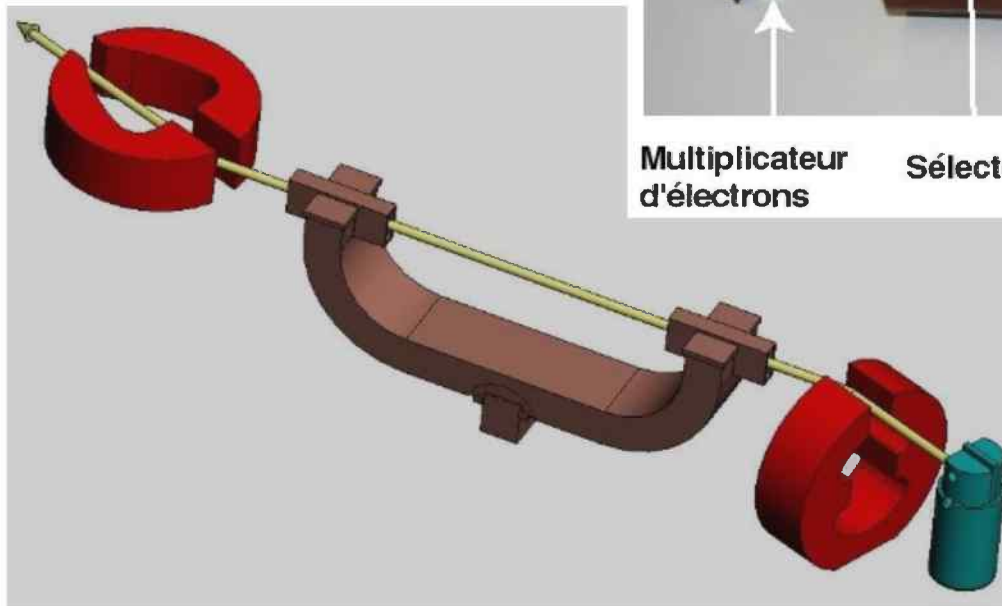


# HORLOGE ATOMIQUE

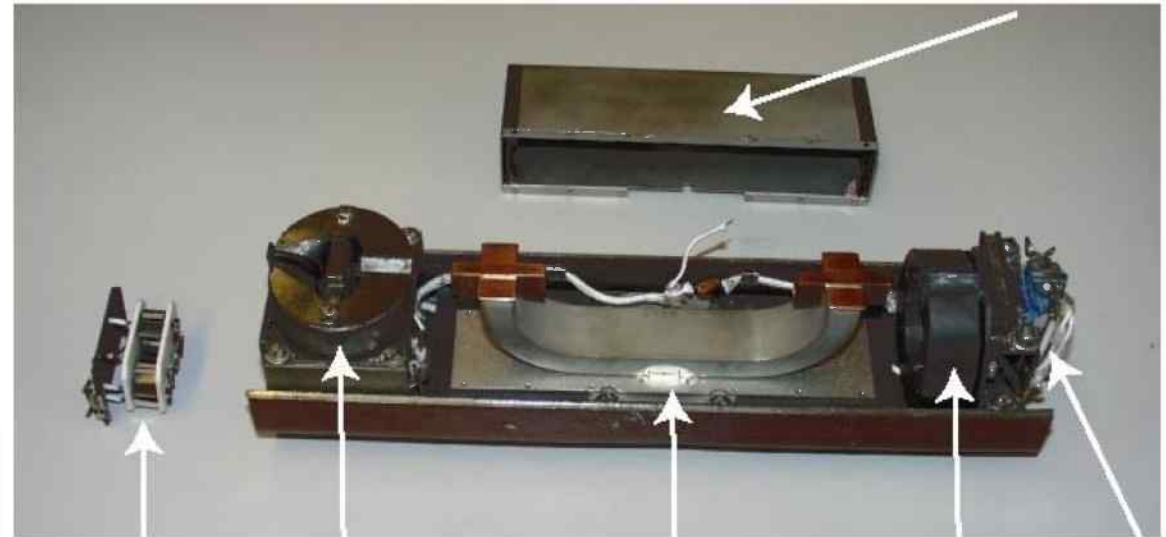
## Résonance magnétique

3 familles d'horloges atomiques commerciales: césium, Masers, rubidium.

Environ 15 types d'horloges atomiques expérimentales et/ou pour la recherche



## Horloge à jet de Césium



Blindage magnétique

Multiplicateur d'électrons

Sélecteur B

Cavité de Ramsey

Sélecteur A

Source de césium

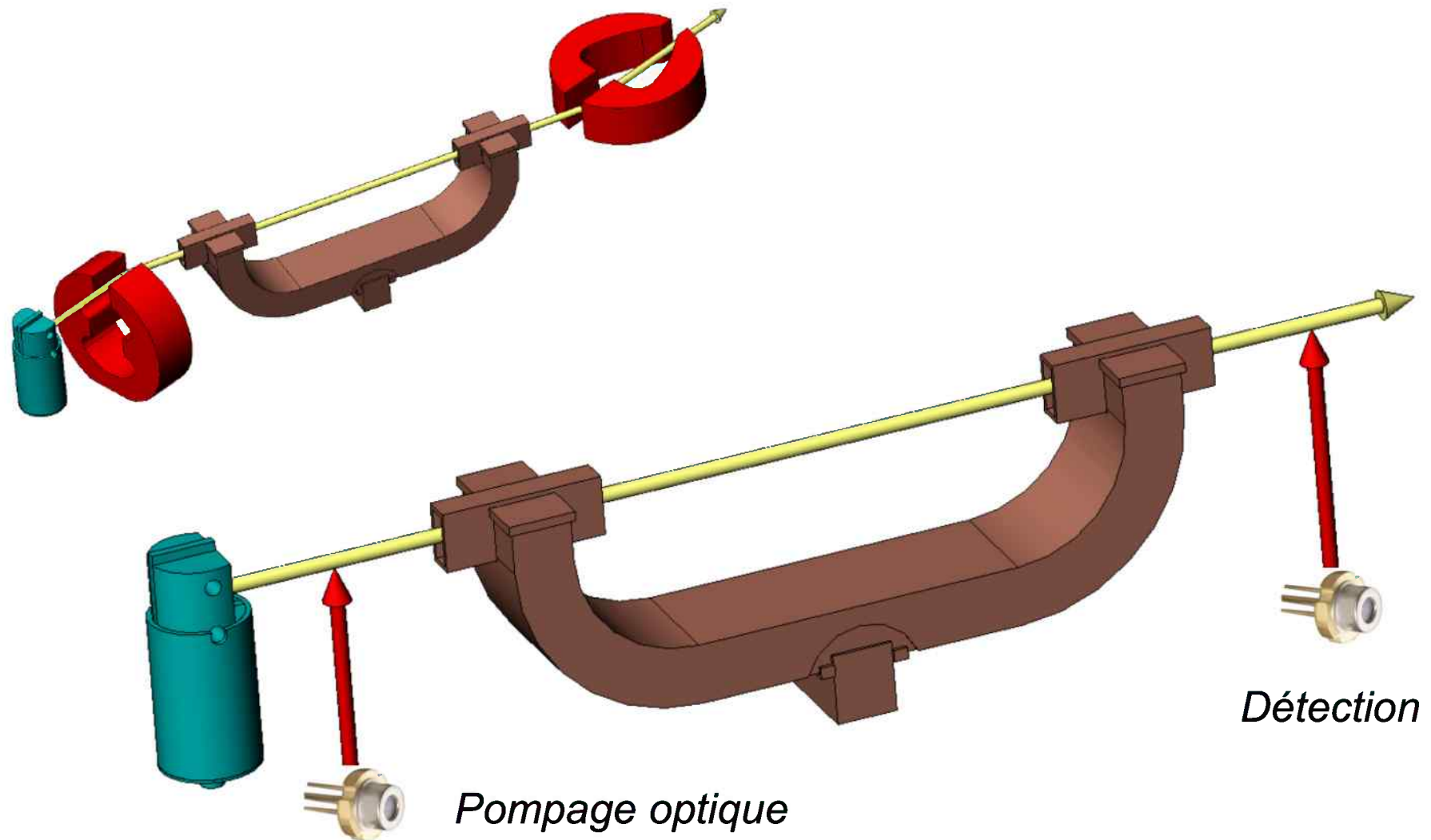
Facteur de qualité:

$$Q \propto \omega_0 \cdot \tau$$

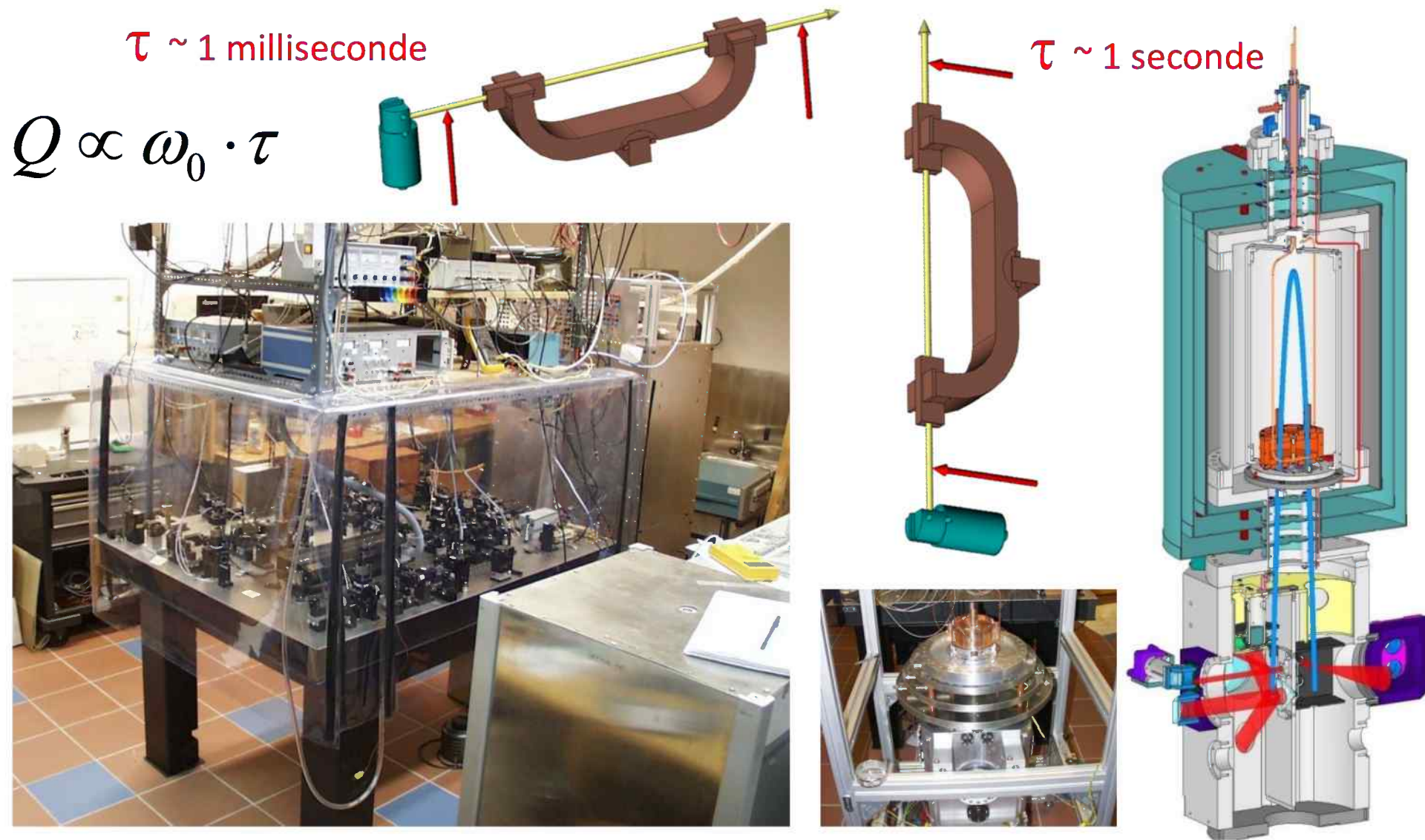
Fréquence de la résonance

Durée de la résonance

### 3) HORLOGE AVEC POMPAGE OPTIQUE LASER



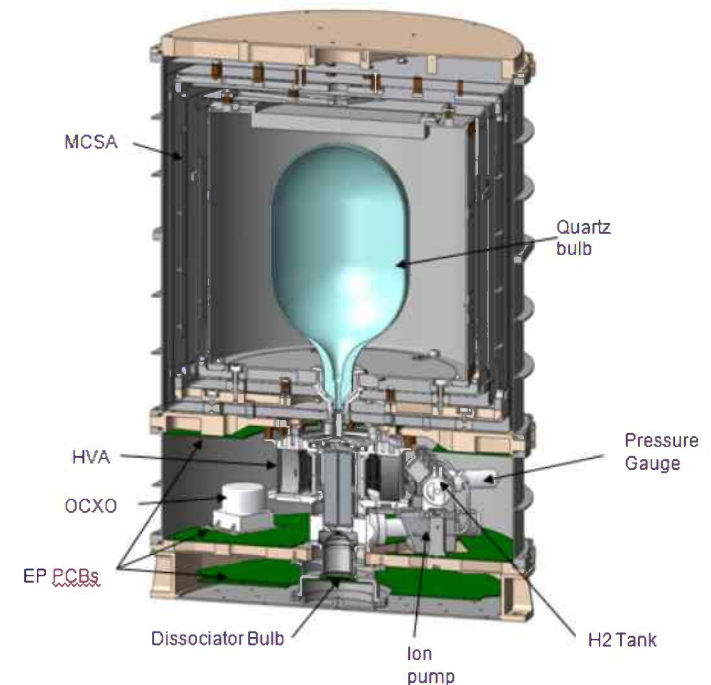
# FONTAINE PRIMAIRE A ATOMES FROIDS (LENTS)



# HORLOGES A ATOMES FROIDS DANS L'ESPACE

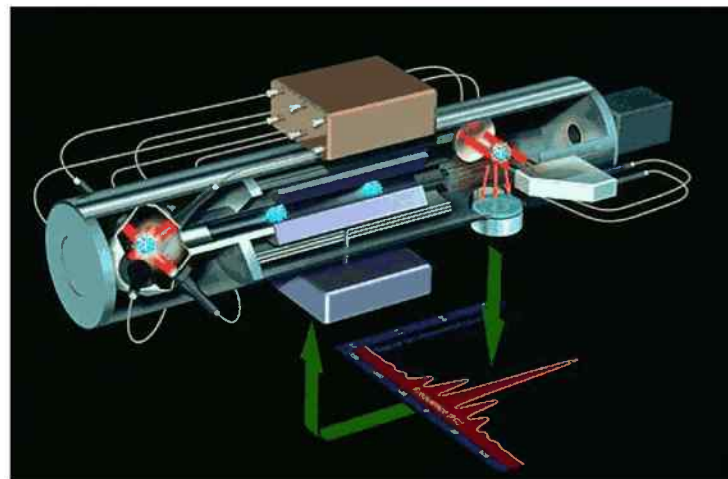


## Atomic Clock Ensemble in Space

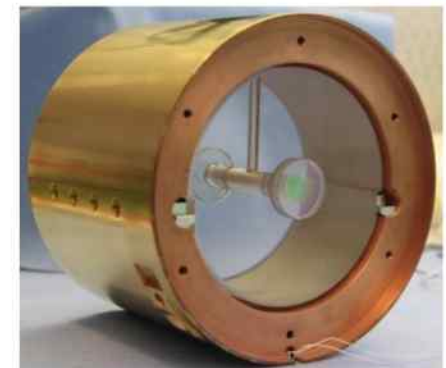


$$Q \propto \omega_0 \cdot \tau$$

$$\tau \sim 10 \text{ secondes}$$

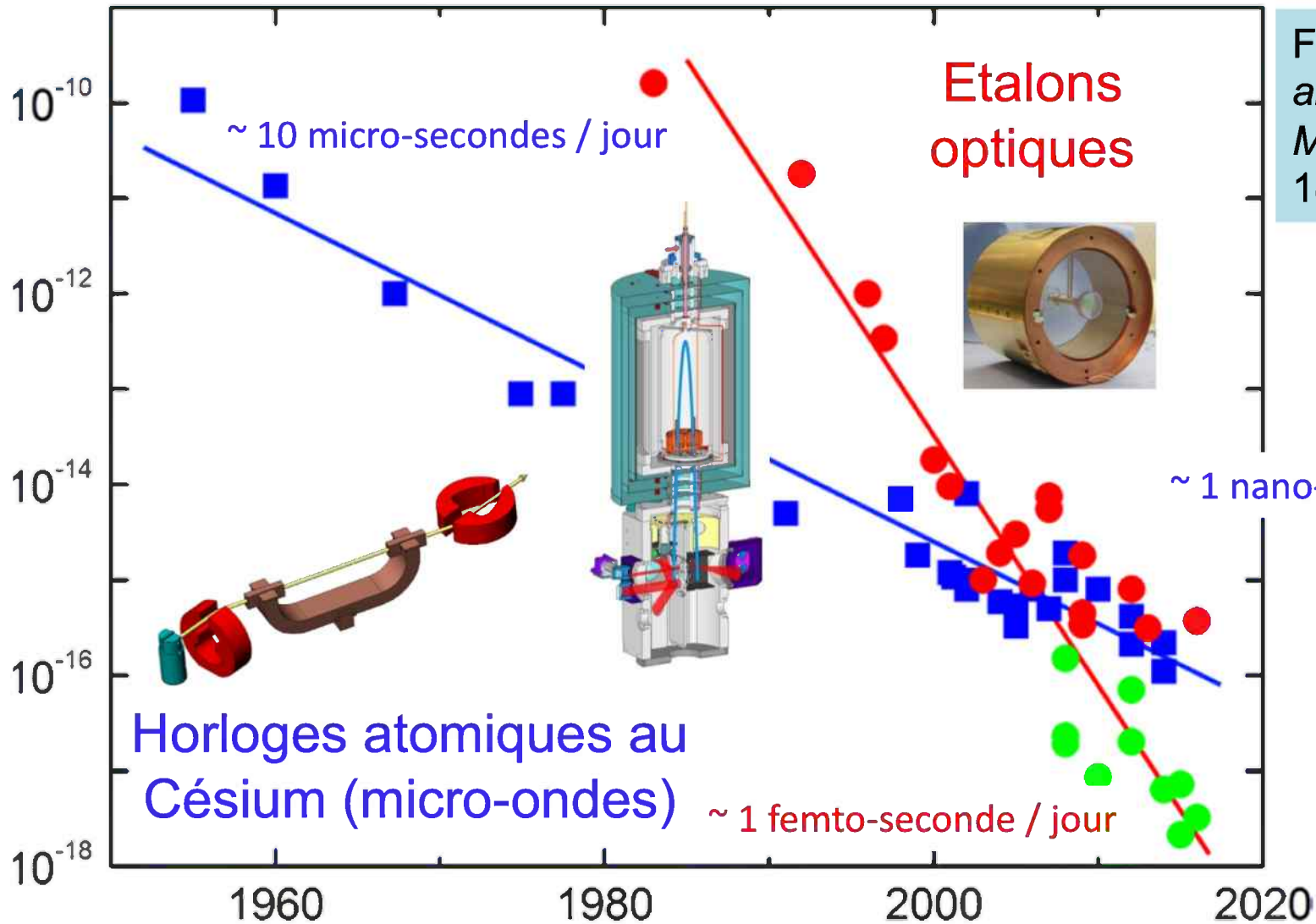


$Q \propto \omega_0 \cdot \tau$       Fréquence «optique»  $\omega_0$ :  $10^9$  Hz  $\rightarrow$   $10^{14}$  Hz



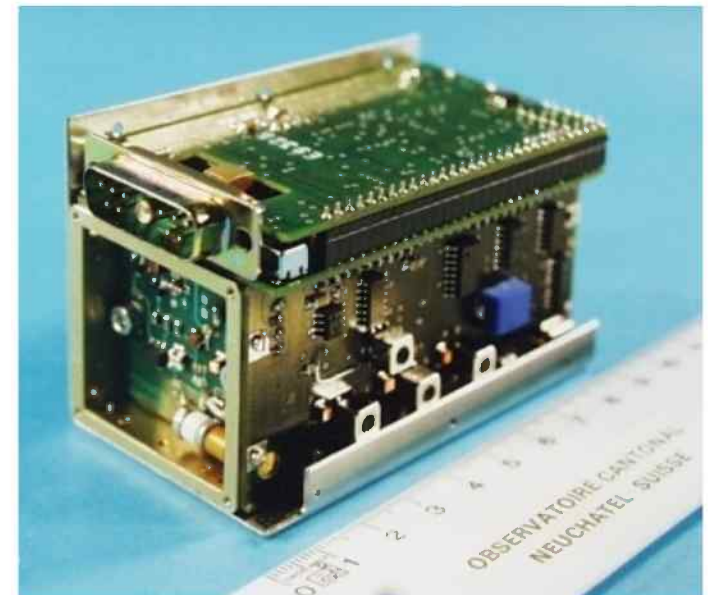
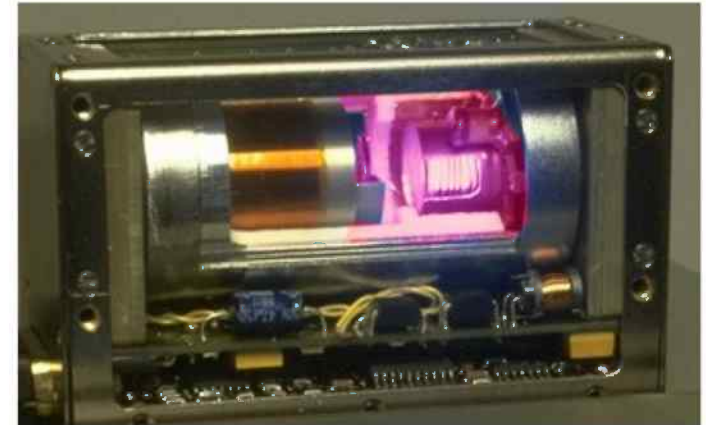
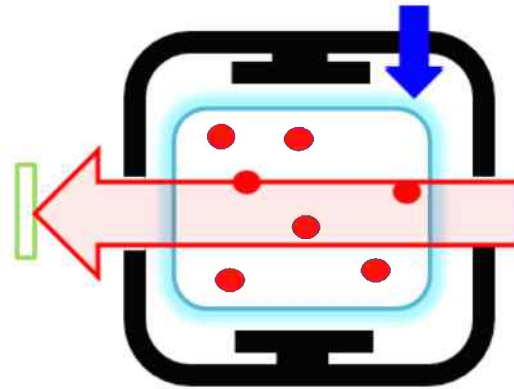
# PRÉCISION DES HORLOGES ATOMIQUES

Exactitude / Stabilité relative

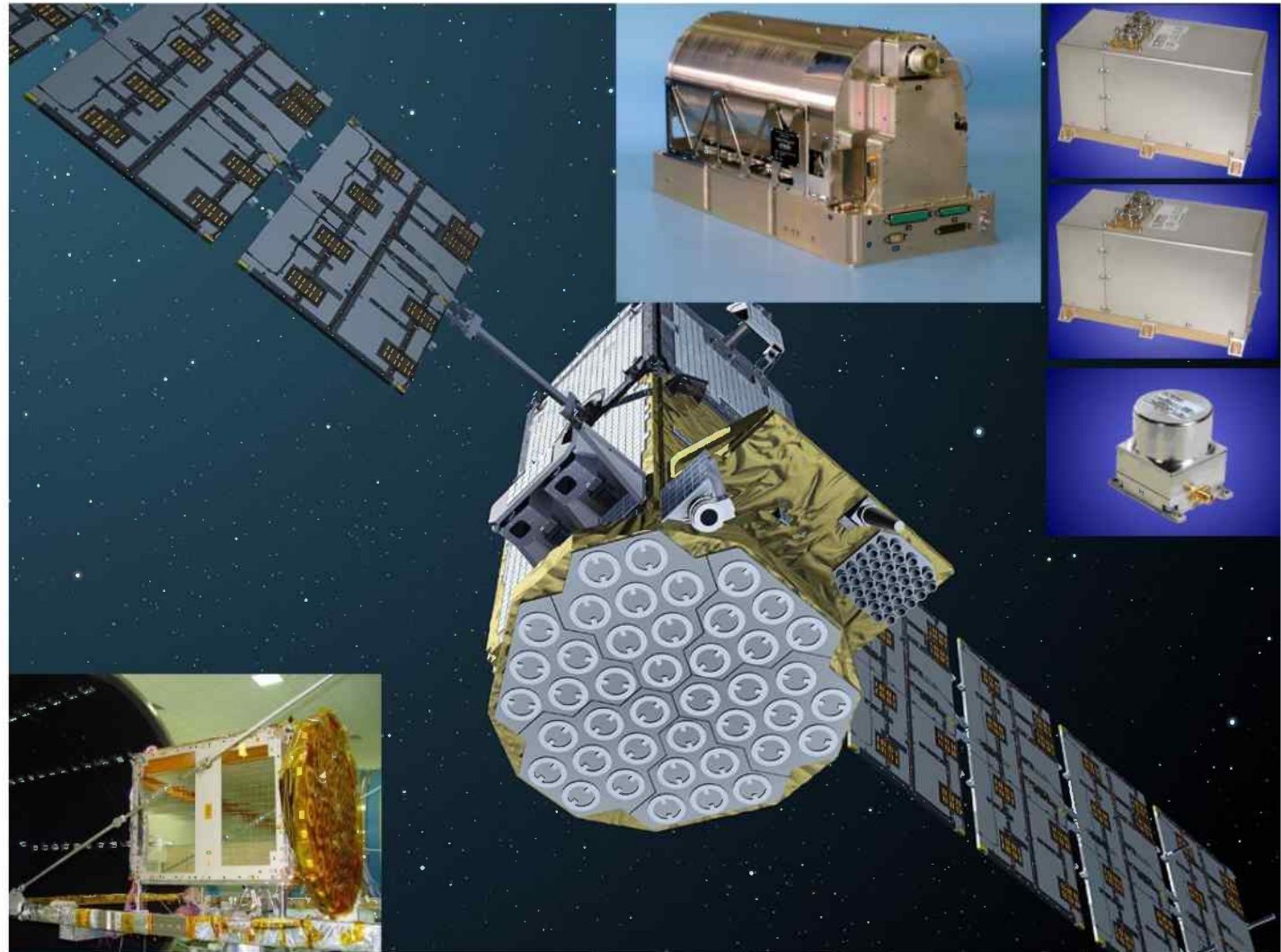
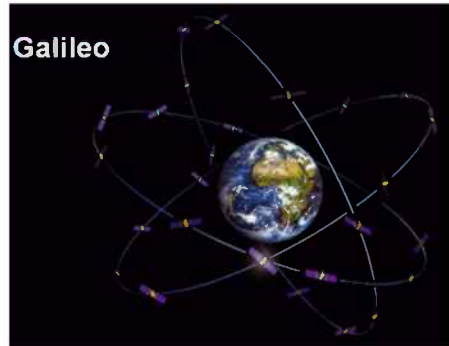


Fritz Riehle et al 2018  
*Metrologia* 55  
188

# HORLOGE ATOMIQUE À VAPEUR DE RUBIDIUM

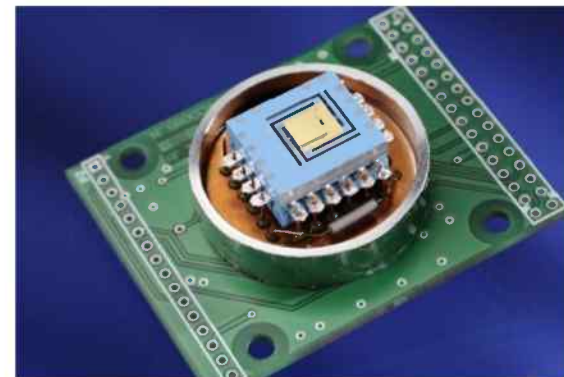
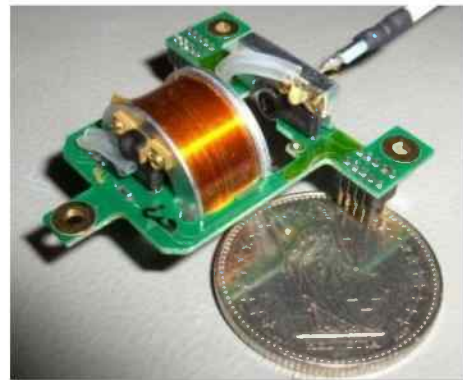
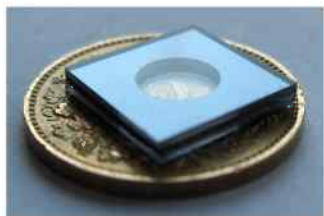
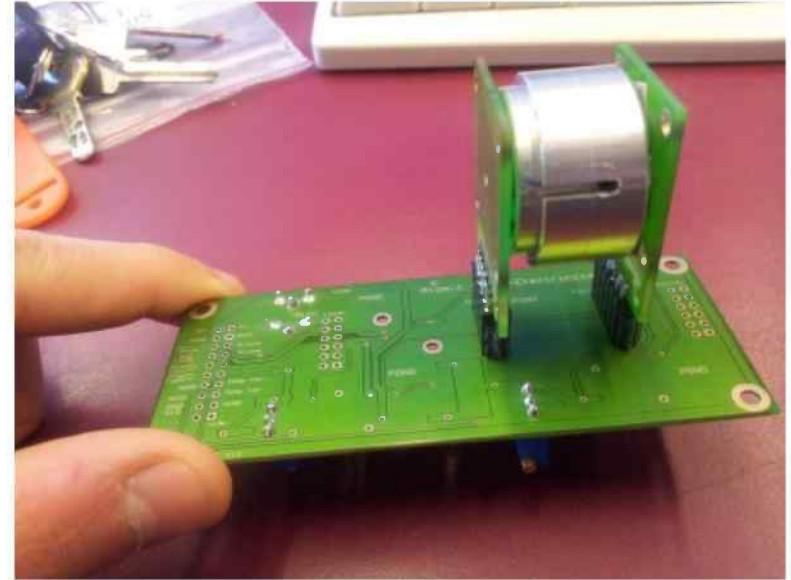
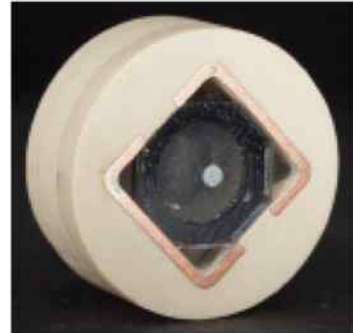


# SYSTÈME EUROPÉEN DE NAVIGATION





# MINIATURISATION



# PROJET MACQSIMAL



Kick-off meeting (03.04.2018)

**miniature atomic vapor-cell Quantum devices  
for sensing and metrology application**

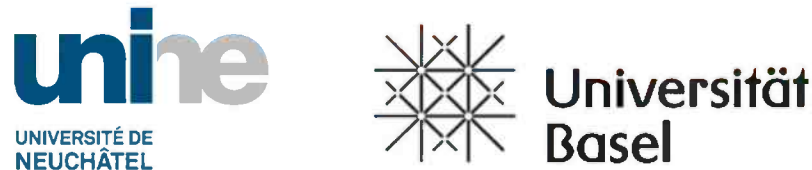
***FET Flagship on Quantum  
Technologies (QT)***

*14 partenaires de 7 pays européens  
(8 universités, 2 RTO, 4 industriels)*

*Financement: 10.2 M€ (dont 3.9 à Neuchâtel)*

*Démarrage: 1.10.2018*

*Durée 36 mois*



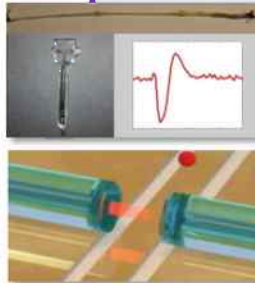
Partenaires suisses de MACQSIMAL



## O1: Miniature Optically Pumped Magnetometers (OPM)

O1.1: Highly sensitive OPM for biomagnetic applications  
TRL 2-3 → TRL 4-5

O1.2: Quantum-enhanced OPM concept  
TRL 1 → TRL 2-3

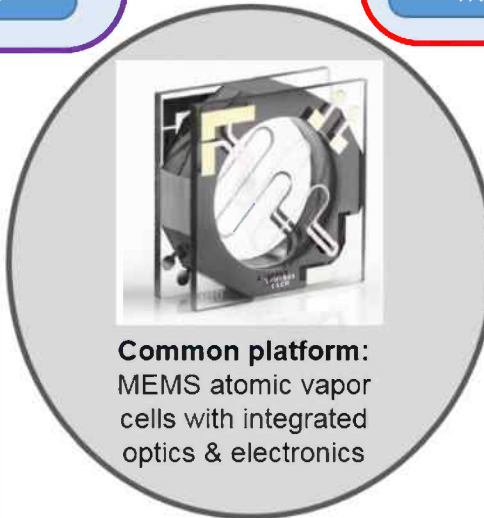
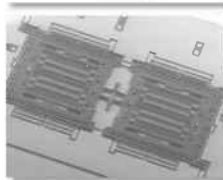
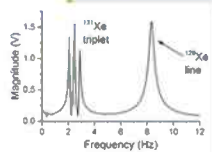


## O3: Miniature Atomic Gyroscopes (MAG)

O3.1: (Spin) Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope  
TRL 2-3 → TRL 4-5

O3.2: SERF Gyroscope  
TRL 1-2 → TRL 3

O3.3: Quantum-enhanced MAG concept  
TRL 1 → TRL 2-3



**Common platform:**  
MEMS atomic vapor cells with integrated optics & electronics

## O5: Rydberg based Gas Sensors

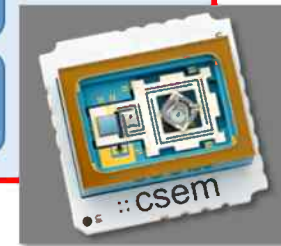
O5: NO sensor  
TRL 1 → TRL 2-3



## O2: Miniature Atomic Clocks (MAC)

O2.1: Flat form-factor, low-power CPT MAC  
TRL 4 → TRL 6-7

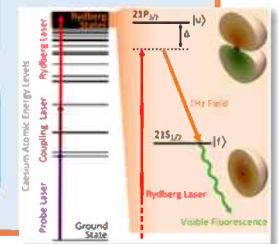
O2.2: Quantum-enhanced MAC concept  
TRL 1 → TRL 2-3



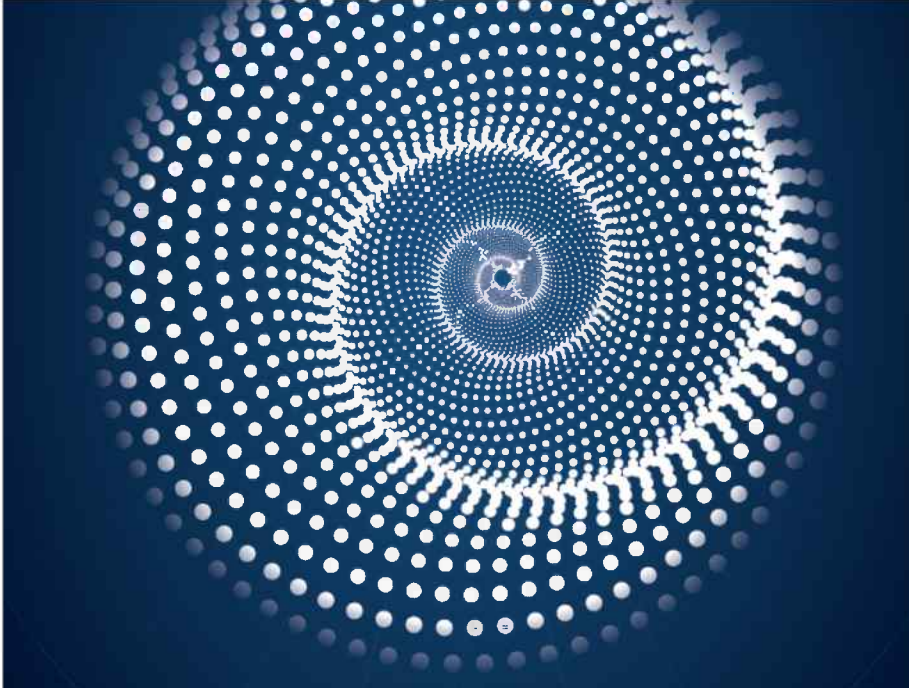
## O4: Atomic GHz & THz Sensors and Vector Imagers

O4.1: Calibration-free detection and vector imaging of GHz and THz fields  
TRL 2-3 → TRL 4

O4.2: Quantum-enhanced GHz sensor  
TRL 1 → TRL 2-3



**MEMS=**  
**Microelectromechanical**  
**systems**



**SPLENDEURS ET MISÈRES DES GRANDES LUNETTES DU XIX<sup>e</sup> SIÈCLE:  
PROUESSES TECHNIQUES, PROGRÈS SCIENTIFIQUE ET ORGUEIL NATIONAL**

**Paolo Brenni (CNR), 10 décembre 2019, 18h15**  
Salle RE 48, Espace Tilo-Frey 1, Faculté des lettres et sciences humaines, Neuchâtel

**unine**  
UNIVERSITÉ DE  
NEUCHÂTEL

**tsrm**

**ASSOCIATION POUR UN MUSÉE  
DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNIQUE**

**FNSNF**  
FONDS NATIONAL SUISSE  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

## TEMPS, SCIENCES ET SOCIÉTÉ

### Cycle de conférences

●

**SPLENDEURS ET MISÈRES DES GRANDES LUNETTES DU XIX<sup>e</sup> SIÈCLE:  
PROUESSES TECHNIQUES, PROGRÈS SCIENTIFIQUE ET ORGUEIL NATIONAL**

●

**Paolo Brenni (CNR), 10 décembre 2019, 18h15**

Salle RE 48, Espace Tilo-Frey 1, Faculté des lettres et sciences humaines, Neuchâtel

●



Paolo Brenni, citoyen suisse né en 1954, a étudié physique expérimentale à l'Université de Zürich, et il s'est ensuite spécialisé en histoire des instruments scientifiques et de l'industrie de précision (XIIIe-XXe siècles). Il est chercheur CNR (Conseil National de la Recherche) à Florence où il travaille pour la Fondazione Scienza e Tecnica et collabore avec le Museo Galileo. Il a étudié, catalogué et restauré plusieurs collections d'instruments anciens en Italie et à l'étranger. Il a publié des catalogues de collections scientifiques et de nombreux articles sur l'histoire des instruments, de leur usage et de leur production.

Entre 2002 et 2013 il a été président de la Scientific Instrument Commission of the International Union of History and Philosophy of Science et il est actuellement président de la Scientific Instrument Society.

# MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Prof. **Gaetano Mileti**

Gaetano.Mileti@unine.ch

Laboratoire Temps – Fréquence (LTF)

<http://www2.unine.ch/cms/lang/fr/pid/4058>

[www.unine.ch](http://www.unine.ch)



### Eclairage



**JULIEN GRESSOT**  
INSTITUT D'HISTOIRE, UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

## MÉTROLOGIE INTERNATIONALE: L'INFLUENCE NEUCHÂTELOISE

**L**e 20 mai 2019, une modification d'envergure est survenue dans le Système international d'unités (SI). Désormais, les unités seront définies sur des constantes de la nature et non plus sur des modèles physiques existants.

Ce changement, dont les implications ne concernent que quelques scientifiques à travers le monde, aura un impact réel dans la vie courante (sans synchronisation très précise, toute la technologie entourant la téléphonie mobile ou les services de géolocalisation ne fonctionnerait pas). C'est l'occasion de rappeler que le canton de Neuchâtel a joué un rôle, certes modeste, dans la

constitution d'un système unifié de mesures par le biais d'Adolphe Hirsch (1830-1901), premier directeur de l'Observatoire cantonal.

En 1864, Adolphe Hirsch est désigné pour représenter la Suisse à la Conférence géodésique internationale dont il sera, dès l'origine, l'un des deux secrétaires, puis le secrétaire permanent entre 1886 et 1900.

En 1867, l'Association internationale de géodésie recommande l'adoption du système métrique. Cette annonce contribue à la création de la Convention du mètre en 1875, dans laquelle Adolphe Hirsch aura une influence certaine. En effet, durant

les séances des délégués, il soutient avec force la création d'un organe permanent chargé du développement de la métrologie, proposition qui sera finalement retenue.

### ADOLPHE HIRSCH A PARTICIPÉ À LA CONCRÉTISATION DE CE VIEUX RÊVE RÉVOLUTIONNAIRE.

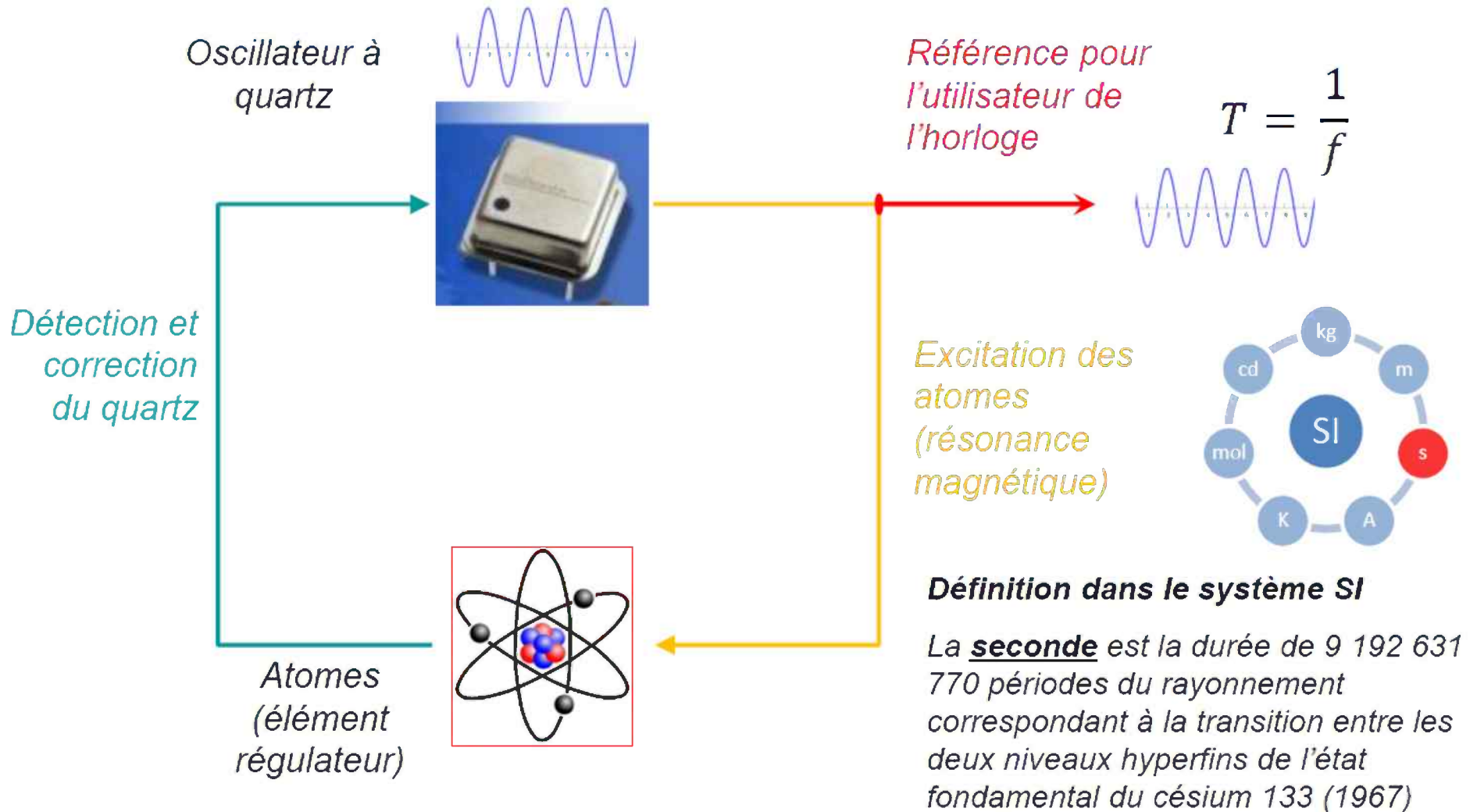
Il occupe aussi le poste de premier secrétaire du Comité international des poids et mesures jusqu'à son décès en 1901. Charles Edouard Guillaume (1861-1938), originaire de

Fleurier, suit l'exemple d'Adolphe Hirsch en travaillant au Bureau international des poids et mesures, qu'il dirige entre 1915 et 1936.

Avant cette unification, les systèmes de mesures étaient très différents d'une région à l'autre, compliquant notamment vie quotidienne et recherche scientifique. A une époque où la quête d'une précision toujours plus grande était à l'œuvre, ces particularismes n'étaient plus souhaitables. Adolphe Hirsch a participé à la concrétisation de ce vieux rêve révolutionnaire d'instaurer un système métrique censé supprimer l'arbitraire et accroître l'harmonie entre les peuples.

20 mai 2019: entrée en vigueur de la réforme du Système International (SI) des Unité  
A. Hirsch (1830-1901): fondateur de l'Observatoire de Neuchâtel  
C.-E. Guillaume (1861-1938): prix Nobel de physique

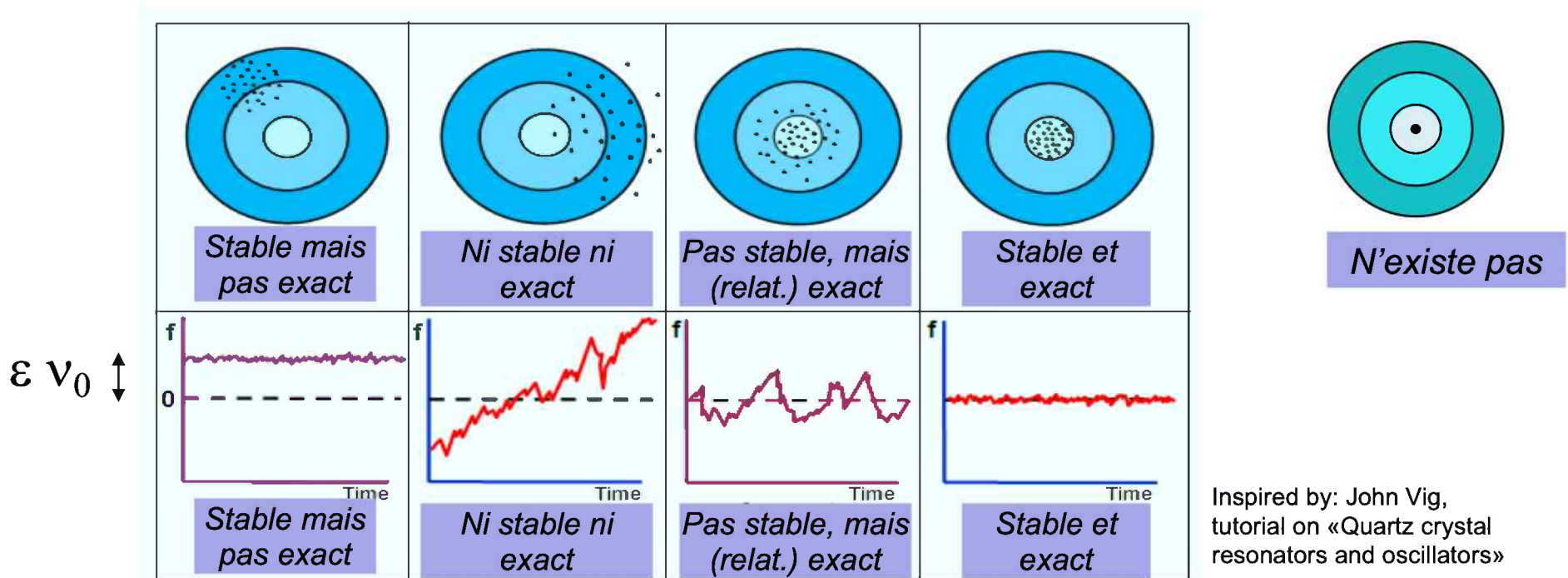
# PRINCIPE D'UNE HORLOGE ATOMIQUE



# STABILITÉ ET EXACTITUDE

Fréquence d'un oscillateur:  $\nu(t) = \nu_0 [1 + \epsilon + y(t)]$

*Biais systématique* ←      →



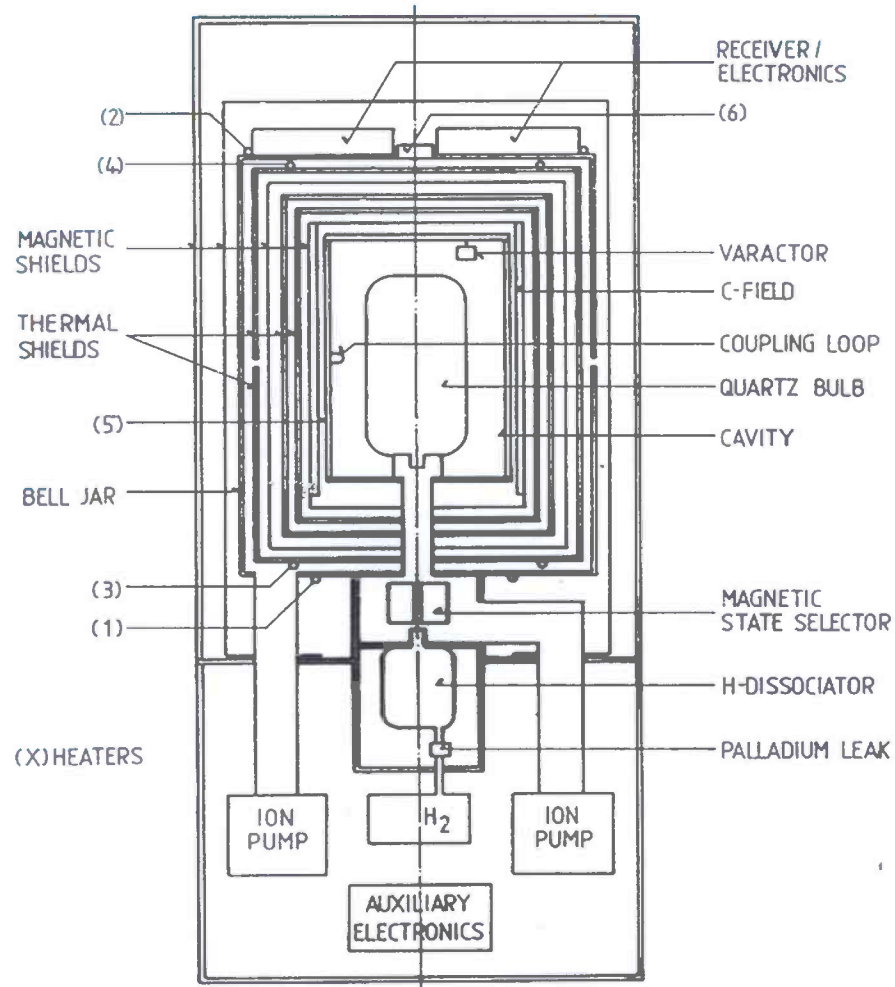
Inspired by: John Vig, tutorial on «Quartz crystal resonators and oscillators»

## Comment mesurer, déterminer la stabilité et l'exactitude?

- En le comparant à un oscillateur plus stable et/ou plus exact
- Par des études de type métrologique (y-compris des mesures de bruit)



# MASER À HYDROGÈNE



**10<sup>-13</sup>  
@ 1s**

**10<sup>-15</sup>  
@ 100s**

$$\sigma(\tau) \sim 1/\tau$$

**100 kg**

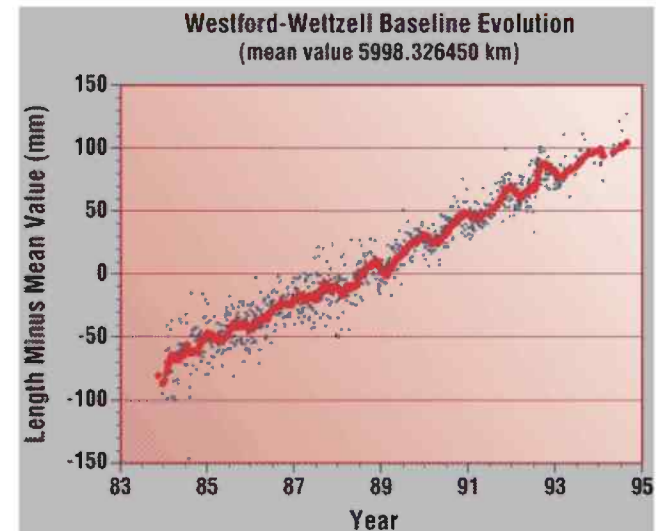
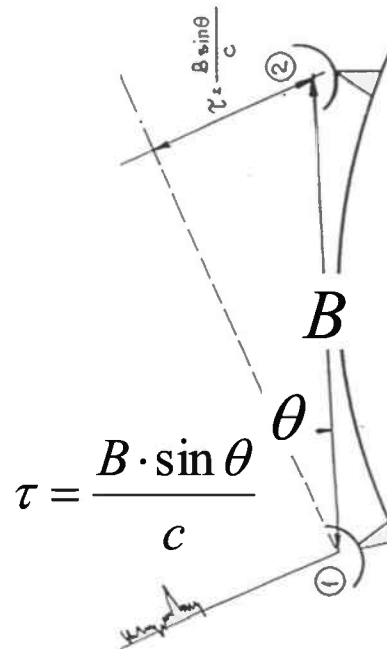
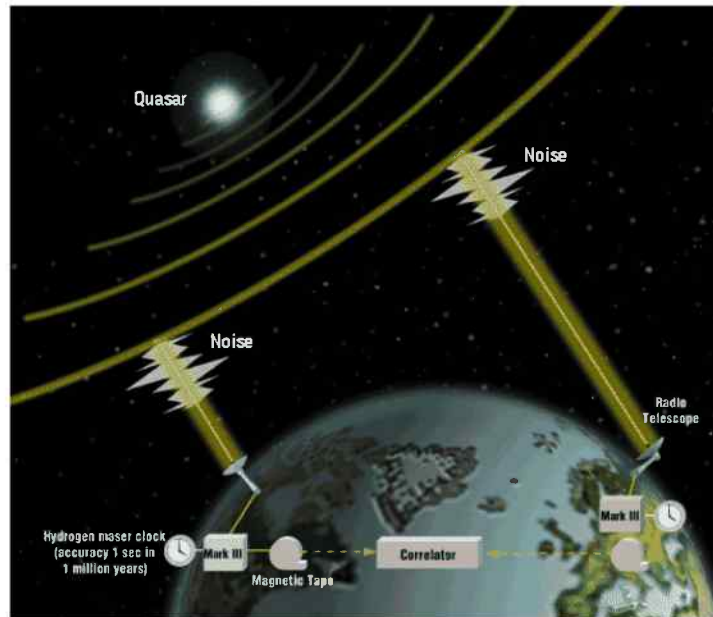
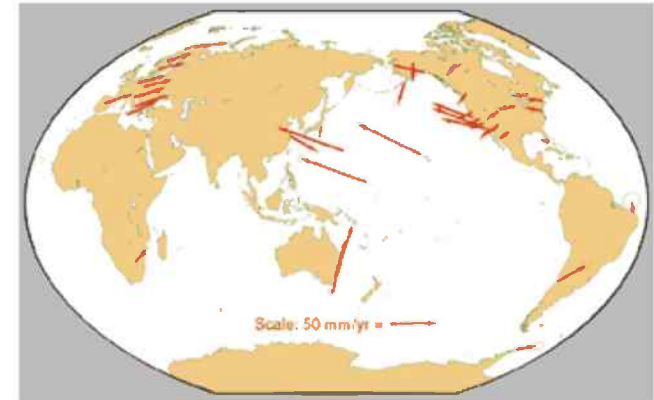


# VLBI (INTERFÉROMÉTRIE A LONGUE LIGNE DE BASE)

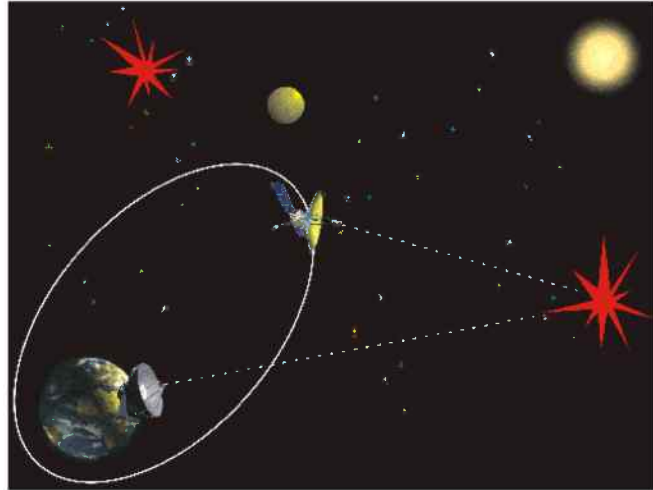
Les Masers ( $10^{-15}$  @  $\sim 1000-10'000$  s) servent à augmenter la resolution des télescopes

- Résolution angulaire:  $\sim \lambda / \text{diamètre}$
- 1 radio-télescope:  $\sim 1 \text{ mrad}$  ( $10^{-3}$  rad)
- 2 radio-télescopes:  $\sim 1 \text{ nrad}$  ( $10^{-9}$  rad)

Rotation de la Terre:  $1 \text{ mrad} \rightarrow 6 \text{ km} \rightarrow 14 \text{ s}$



# MISSION RADIOASTRON (VLBI SPATIALES)



But: augmenter la ligne de base B de 30'000 to 300'000 km, en mettant un des radio-telescope (et le Maser!) dans l'espace.

