

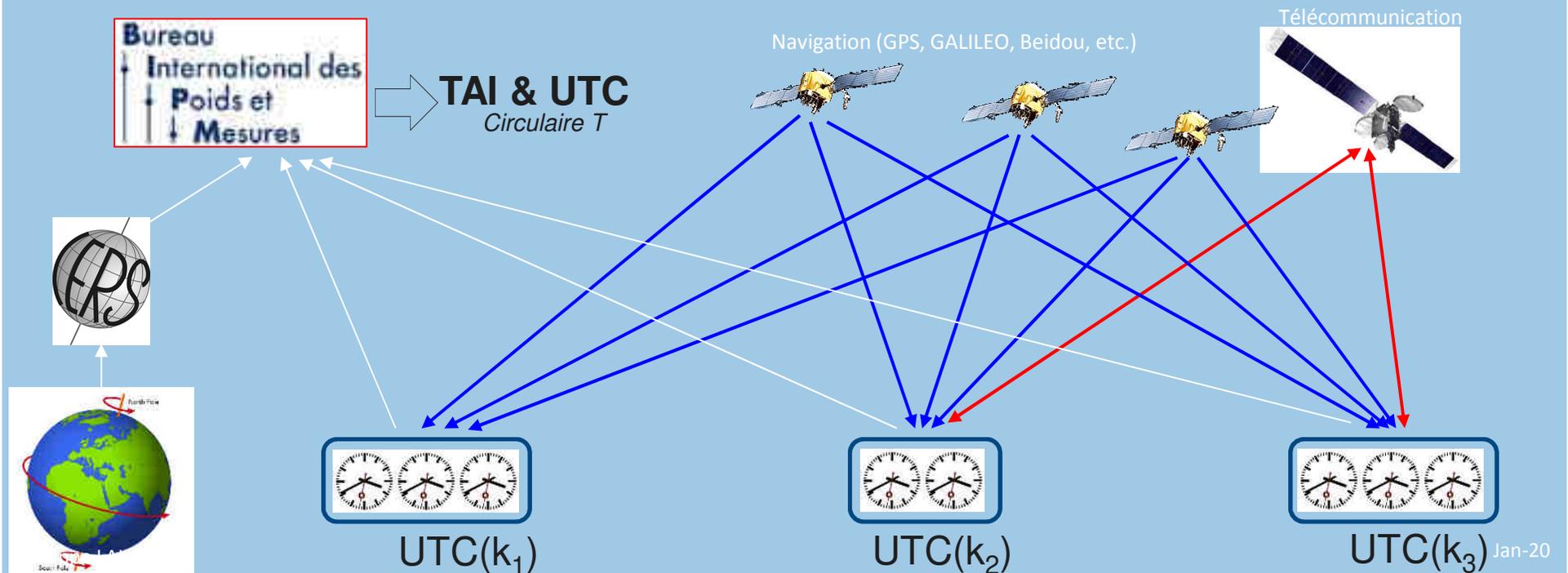
SCIENCE
DES
HORLOGES ATOMIQUES
POUR LA
SCIENCE

SYRTE (LNE, OBSERVATOIRE DE PARIS)



- Missions: Trouver, Développer et Diffuser les meilleures références de temps/fréquence et d'espace
Communauté scientifique et la synchronisation (systèmes d'informations, navigation et positionnement).

Les références de temps s'appellent TA (Temps Atomique) et UTC (temps terrestre), diffusée par ondes radio, réseaux,...



Parmi toutes les unités, c'est la seconde qui est la mieux réalisée (la plus petite incertitude) et de loin. (m, kg, mol, K, cd, A)

1. Petit résumé en science fondamentale
2. Mesure du temps:
 1. Principe
 2. Réalisation
3. Horloges de référence
4. Développements en cours: horloges optiques
5. Mission spatiale ACES/PHARAO



- L'Infiniment petit est bien décrit par « le modèle standard »
- Ses particules et ses constantes d'interaction α (faible, forte, électromagnétique). Une mécanique des états qui est non local.
 - La physique d'une horloge atomique repose sur ce modèle



- L'infiniment grand est bien décrit par la relativité générale:
une géométrie d'espace temps à 4 dimensions x, y, z, t , qui dépend de la force gravitationnelle définie par sa constante G . Une mécanique du point, local.
Il existe toutefois des anomalies dans la dynamique stellaire et il faut aussi ajouter de l'énergie noire (?) et de la matière noire (?)

Ces 2 cadres théoriques sont incompatibles : non local et local. Il existe des théories alternatives qui tentent sans succès pour l'instant de supprimer cet obstacle.

Or, intéressant, les horloges atomiques dont le principe repose sur le modèle standard permettent de tester la relativité générale, et cela de plus en plus finement...

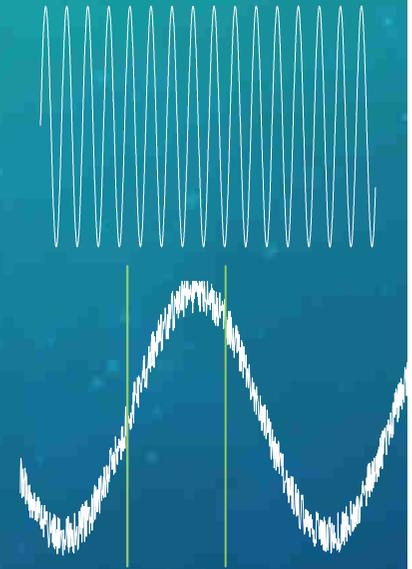
Mesure du temps: Principe

UNE RÈGLE TEMPORELLE ET COMPTER LES TICS

Un mouvement périodique $T=1/f$.

On compte les passages à 0

plus une fraction de période $t=(n+x)/f$



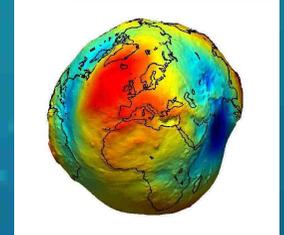
L'incertitude sur la mesure est donnée

par le niveau de bruit et par la connaissance de la fréquence f

- Un grand rapport signal à bruit, une fréquence élevée
- Augmenter le temps de mesure pour moyennner le bruit
- Donner une définition commune pour f et réaliser cette définition au mieux (plus faible incertitude)

QUELQUES MOUVEMENTS PÉRIODIQUES UTILISABLES

- La rotation de la terre: mouvement de grande amplitude, visible par tous. Utilisée < 1967, mais irrégularités (non rigide, dissipation,...)
 $dt/t \sim 10^{-10}$



- Oscillateurs (RLC, quartz, laser...) : fréquence élevée (10^3 - 10^{15} Hz), bon niveau de bruit, mais non reproductible (matériau, forme, vieillissement, ...).



➤ Il faudrait un oscillateur plus fondamental:

basé sur des constantes physiques

Un atome est capable d'absorber ou d'émettre du rayonnement électromagnétique (un signal de fréquence f)

La fréquence de cette résonance est définie par les interactions fondamentales qui lient des particules tout aussi fondamentales (électron, quarks,... stables)

Cette fréquence pourrait donc être infiniment stable et elle est identique pour les mêmes atomes où qu'ils soient (mesure locale): reproductibilité et universalité

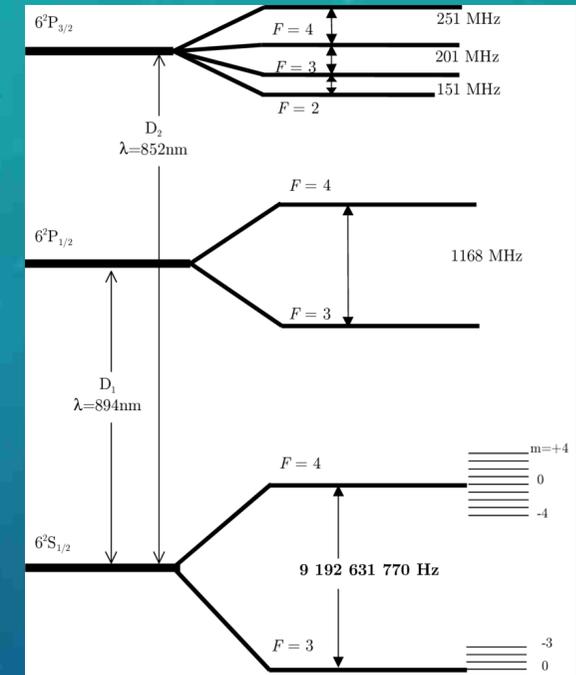
Energies atomiques

Les états d'énergies internes d'un atome sont quantifiés
Les résonances atomiques se produisent entre 2 états d'énergie (états électroniques ou nucléaires)
écart en fréquence défini par $E_2 - E_1 = h \times f$

Beaucoup de ces états ont une durée de vie très courte t (couplage avec le vide, 10^{-9} s)

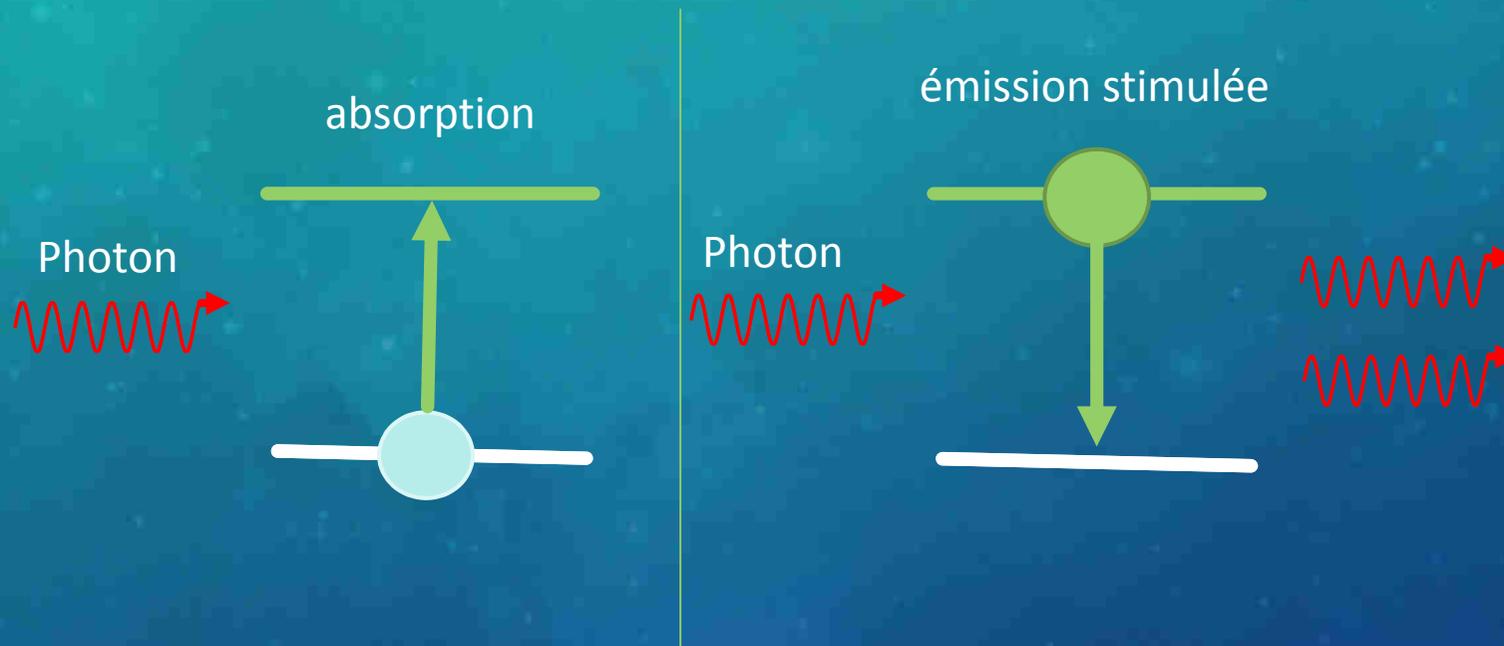
➤ Un signal de résonance large en fréquence $\Delta f \sim 1/t$, pas idéal pour fournir une bonne mesure de la fréquence f .

Cependant il peut exister des états de très longues durées de vie (de la seconde à l'âge de l'univers).



TRANSITION ENTRE ÉTATS D'ÉNERGIE DE L'ATOME

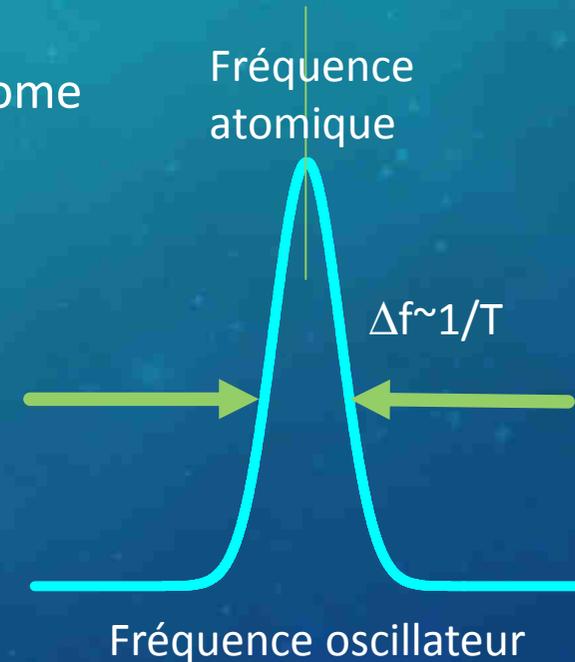
2 processus équivalent: absorption, émission stimulée d'un photon



La Probabilité du processus dépend de l'écart de fréquence.
Elle vaut 1 lorsque la fréquence du photon est égale à la fréquence
de résonance atomique

PRINCIPE D'UNE HORLOGE ATOMIQUE

1. Génération d'un signal électromagnétique proche de la résonance et accordable en fréquence: se fabrique facilement à partir d'un oscillateur (quartz)
2. Préparation de l'état atomique initial
3. Interaction du signal pendant une durée T avec l'atome
4. Mesure de l'état atomique (signal de résonance)



Mesure à droite $\Delta f/2$ puis une mesure à gauche $-\Delta f/2$

Si différentes alors correction de fréquence pour maintenir le signal centré sur la résonance atomique (gauche=droite).

Le signal de l'oscillateur asservi devient alors le signal d'horloge

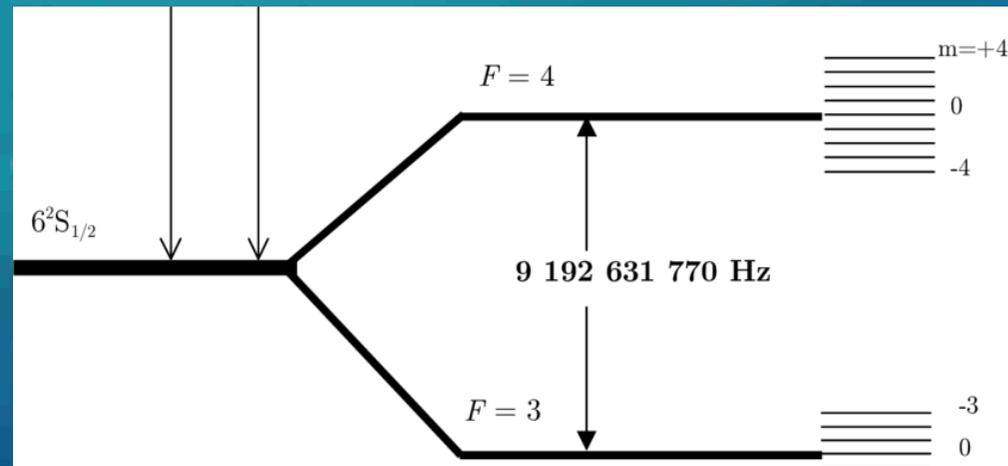
L'ATOME DE CÉSIIUM

- Isotope 133 est stable
- 2 états d'énergie avec une longue durée de vie
- une fréquence de transition élevée et facile à générer



DÉFINITION DE LA SECONDE (1967)

- La seconde est la durée de 9.192.631.770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de Césium 133.



- On a la méthode, on a la référence, on a donc l'horloge...

Pas tout à fait:

La définition suppose un atome isolé et au repos.

Et la réalité est bien entendue toute autre...

L'atome va interagir avec tous les types de champs électromagnétiques (écrans d'isolation, contrôle) avec les atomes environnants (ultra vide, vapeur atomique)

Et

Il a une vitesse

Un atome à température ambiante a une vitesse de 700 km/h

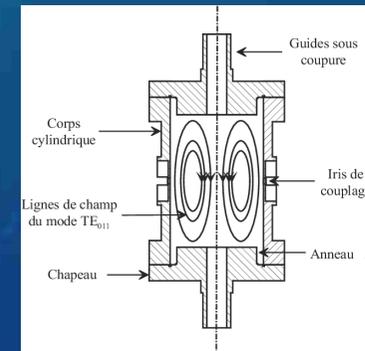


Par effet Doppler l'atome voit une fréquence décalée de 200 Hz pour une onde qui se propage!

Rendre la phase de l'onde indépendante en position pour éliminer l'effet Doppler: Injecter l'onde dans une cavité pour créer une onde dite stationnaire

Mais on ne peut pas faire une onde parfaitement stationnaire, résidu d'effet Doppler

Ralentir les atomes...



RALENTIR UNE VAPEUR D'ATOMES PAR REFROIDISSEMENT LASER

Un photon transporte aussi une quantité de mouvement P
Lorsque l'atome absorbe ce photon, sa vitesse change de P/m



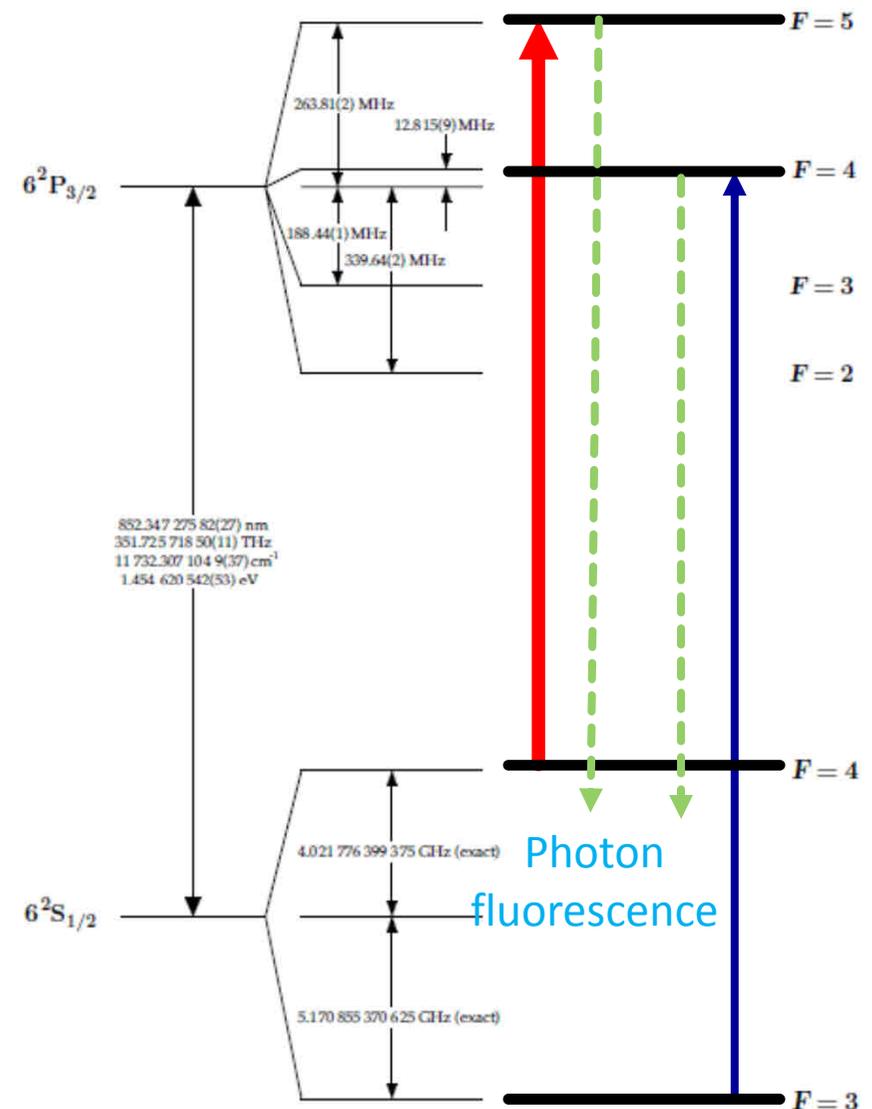
Avec une résonance atomique à durée de vie courte: beaucoup de photons absorbés dans la même direction et les photons sont réémis mais dans toutes les directions: ralentissement. Sur les 3 directions: refroidissement.

Le césium possède ce type de transition à 852 nm

A chaque photon absorbé
la vitesse atomique change de 3,5 mm/s

Et peut en absorber 10 000 000/s
Décélération approximative de 35 000 m/s²

Avec 6 faisceaux laser,
le long des 3 directions de l'espace,
bien équilibré en puissance et à la
bonne fréquence,
Une vapeur de césium à
température
ambiante (300 K) est refroidie à
1μK (V=1cm/s) en moins d'une
seconde.



Dernière amélioration : Méthode d'interrogation

Pendant l'excitation la probabilité de transition est aussi sensible à l'amplitude du signal.

Pour réduire cette sensibilité une interaction de Ramsey:
2 excitations de durée courte t séparées par un temps mort $T \gg t$.
Largeur de résonance $\sim 1/T$.

FONTAINE ATOMIQUE

La première horloge en fontaine(SYRTE,1995)

Aujourd'hui, une dizaine de fontaines dans le monde qui sont les références primaires de fréquence pour la définition

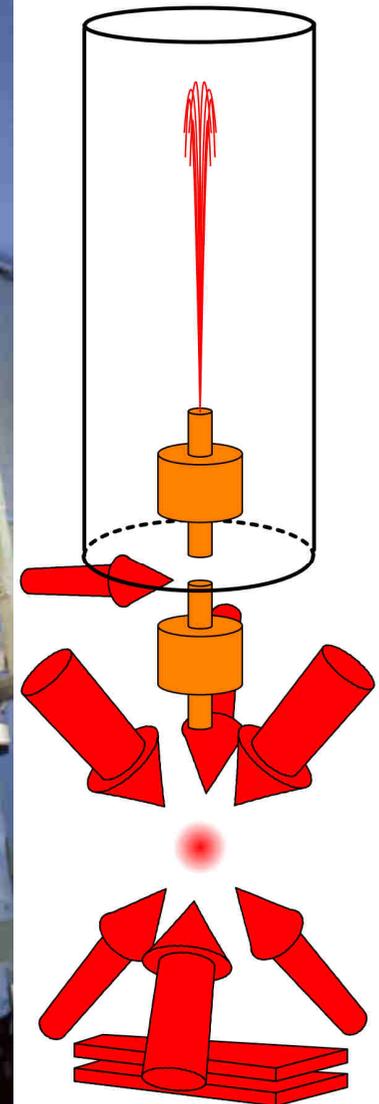
Exactitude : 10^{-15} - 10^{-16}

$dt/t=df/f$

Somme statistique des incertitudes sur les déplacements de fréquence

- Champ magnétique
- Rayonnement du corps noir
- Collisions entre atomes froids
- Collisions avec les autres atomes
- Effet Doppler
- Effet des autres transitions
- Effet de recul

Erreur inférieure à 100 s sur l'âge de l'Univers



Comment faire beaucoup mieux...

Les incertitudes sur les déplacements de fréquence df sont déjà très faibles et seront difficiles à améliorer.

En revanche on peut chercher à augmenter la fréquence et améliorer $df/f=dt/t$ donc les mesures de temps.

Les atomes ont aussi des transitions dans le domaine optique 10^{15} Hz avec une longue durée de vie.

Mais plusieurs difficultés ont du être résolues...

HORLOGES OPTIQUES

1. Avoir des oscillateurs lasers avec un faible niveau de bruit pour interroger les atomes:

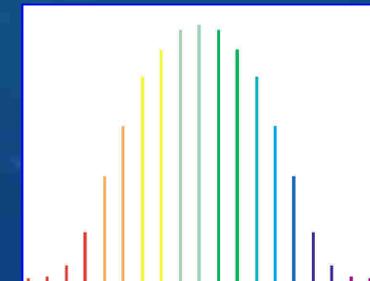
- ✓ techniques asservissement sur cavités ultra-stables



2. Raccorder ces fréquences optiques aux radio fréquences pour pouvoir les intégrer dans le système métrologique.

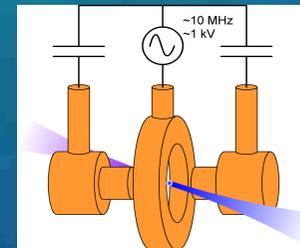
- ✓ Lasers femto-seconde: spectre de raies optiques séparées par une fréquence RF

$$F_{\text{optique}} = n \times F_{\text{RF}} \quad (n \text{ entier, } 50000)$$

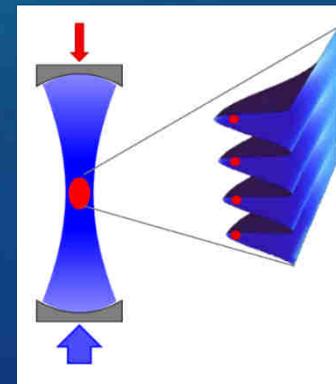


HORLOGES OPTIQUES

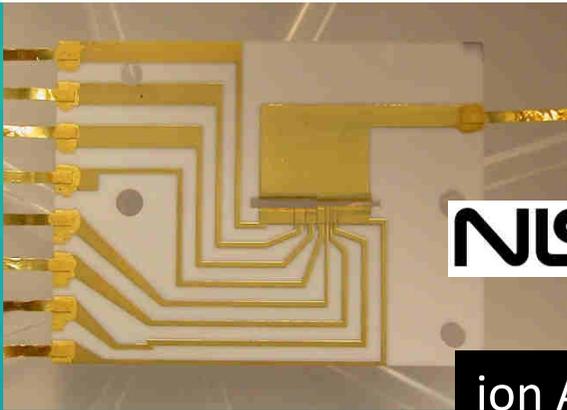
3. Maitriser l'effet de recul: l'absorption du photon optique (forte quantité de mvt) entraine un large déplacement de fréquence
- ✓ Piéger les atomes sans les perturber: 2 types d'horloge optique
 - A ion, facile à piéger



- Utiliser un réseau optique pour les atomes neutres

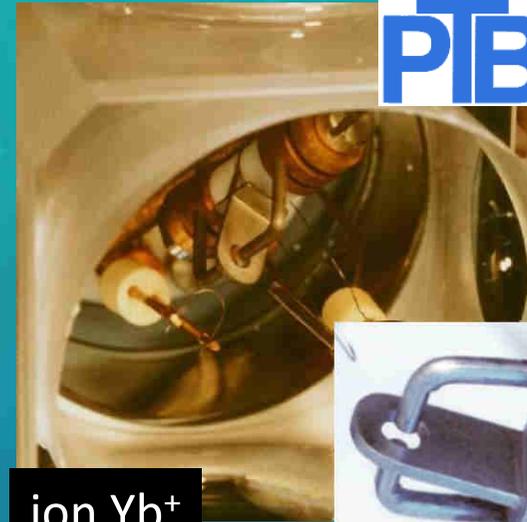


Et toujours refroidir par laser pour réduire l'effet Doppler



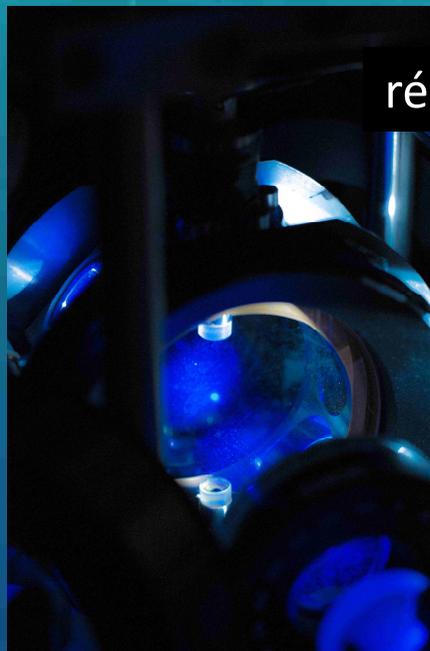
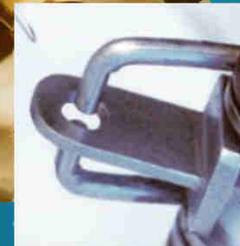
NIST

ion Al⁺

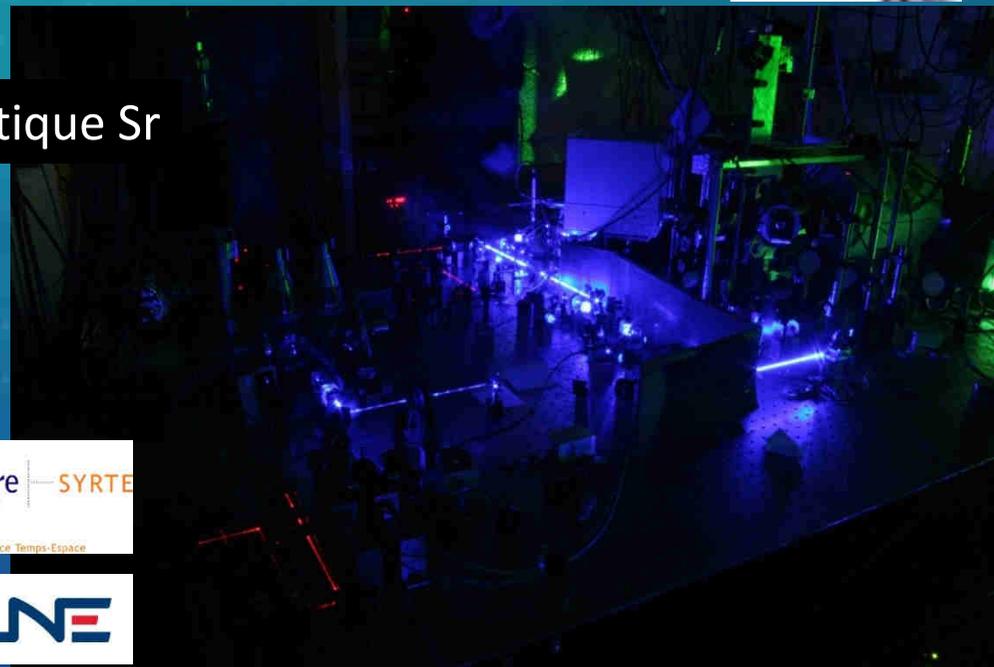


PTB

ion Yb⁺



réseau optique Sr

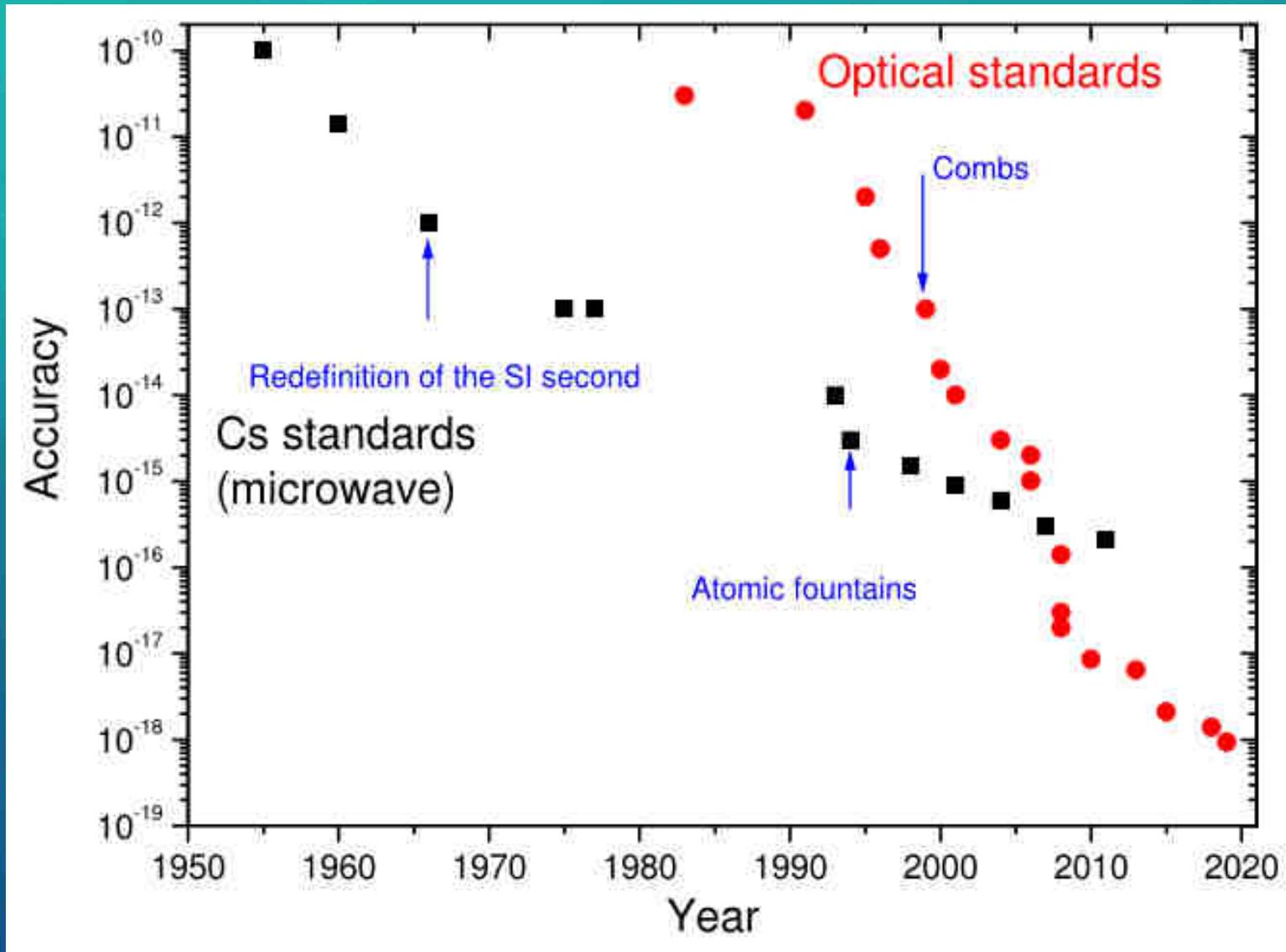


Observatoire de Paris SYRTE
Systèmes de Référence Temps-Espace

LABORATOIRE NATIONAL DE MÉTROLOGIE ET D'ESSAIS LNE

Et d'autres atomes ou ions Hg, Hg⁺, Yb, Cd, Ca,

Performances des horloges atomiques



Une redéfinition de la seconde se profile dans les années à venir

➤ Avec toutes ces horloges à atomes froids, fontaines, optiques, très performances, on peut sonder plusieurs aspects en physique fondamentale:

1. Les constantes du modèle standard :

les fréquences des résonances atomiques dépendent de ces constantes avec un poids différent selon la composition des atomes

➤ **Mesure au cours du temps du rapport de fréquence entre horloges différentes : sans dimension, indépendant du système d'unité, donné par la nature**

$$\nu_B/\nu_A = f_B(\alpha, \Lambda_{\text{QCD}}, m_e, m_u, m_d, \dots) / f_A(\alpha, \Lambda_{\text{QCD}}, m_e, m_u, m_d, \dots)$$

- Une variation de ces rapports peut révéler une variation des constantes fondamentales.
- ✓ **Ces rapports sont mesurés régulièrement et pour l'instant rien de significatif**

2. Existe-t-il un lien entre le modèle standard et la relativité, comme une sorte de couplage entre les 4 forces fondamentales?

Dans ce cas on pourrait trouver une variation dans le rapport de fréquence entre horloges liée au mouvement de la terre dans les champs de gravité, dans la matière noire.

Pour l'instant rien de significatif mais toutes ces mesures permettent de contraindre différents modèles théoriques

3. D'après la relativité générale, le potentiel gravitationnel modifie le rythme des horloges, de l'ordre de 10^{-16} par mètre de hauteur.
Visible sur terre, mais l'effet reste faible pour tester la théorie.

Il faudrait expérimenter tous les points précédents sur
une plus vaste échelle

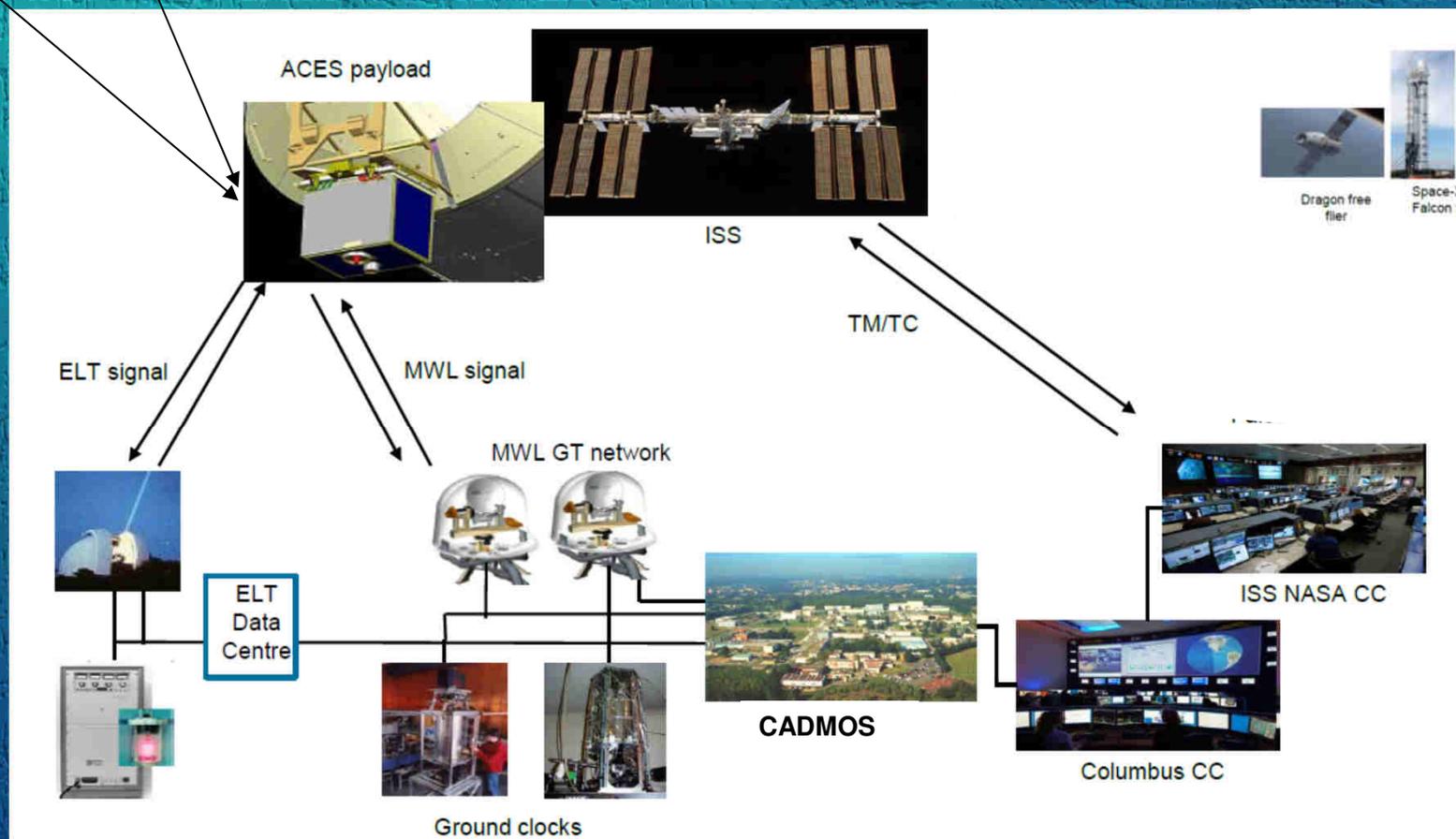
C'est le but de la mission spatiale PHARAO/ACES

ACES: Atomic Clock Ensemble in Space est une mission de l'ESA (LKB, SYRTE)

PHARAO est l'horloge spatiale à atomes de césium refroidi par laser développée par le CNES (SYRTE)

ARCHITECTURE ACES

Base: horloges primaires et secondaires dans des référentiels différents inter-comparées en temps potentiel, vitesse, orientation, stabilité, atmosphère
Raccordées aux signaux GNSS



Station émission/réception (Airbus)

Envoie des signaux synchronisés sur les horloges sol et reçoit les signaux synchronisés par PHARAO pour faire la comparaison bord/sol.

Stations: 2 USA, Allemagne, Angleterre, France, Suisse, Japon

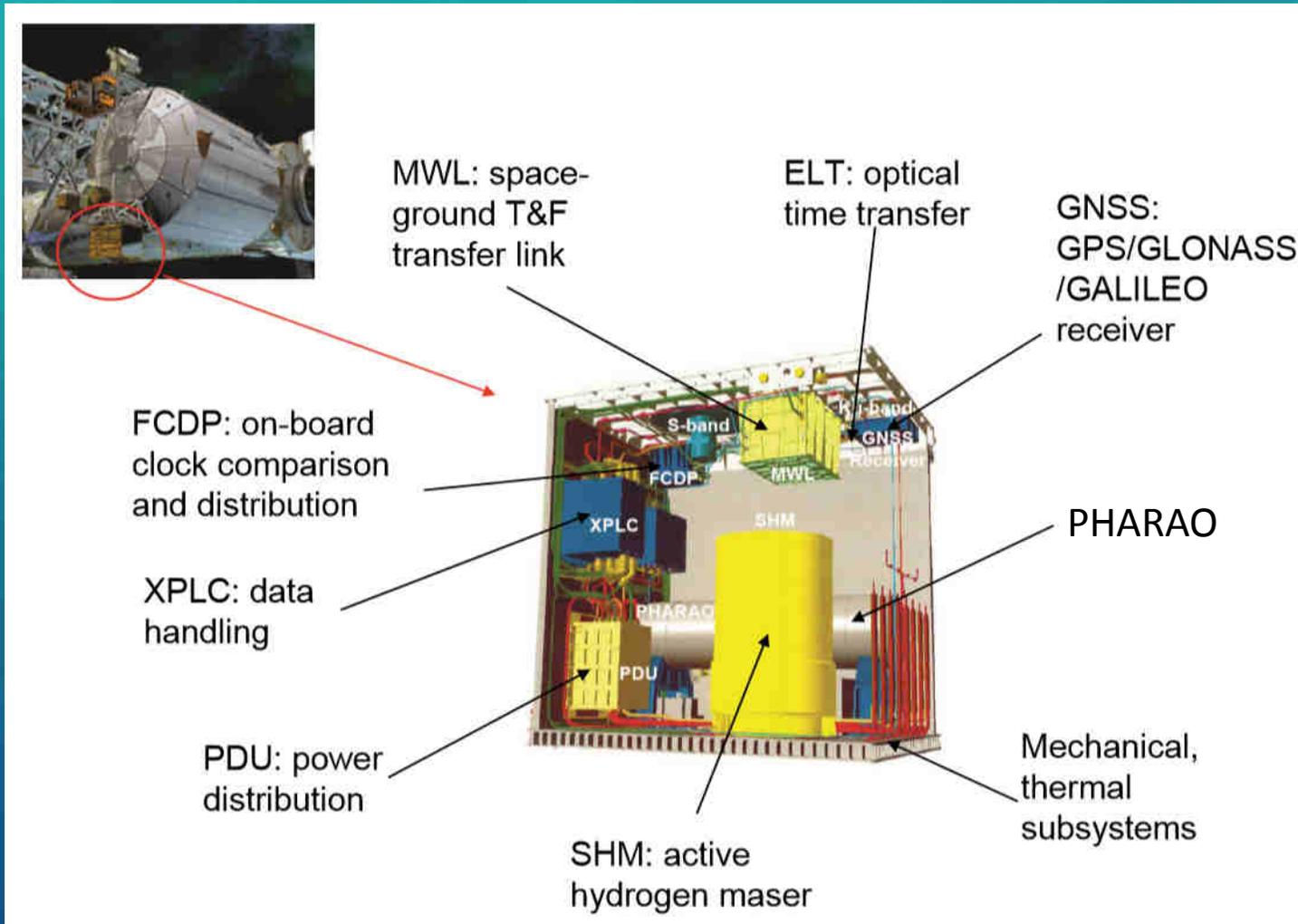


Philippe LAURENT



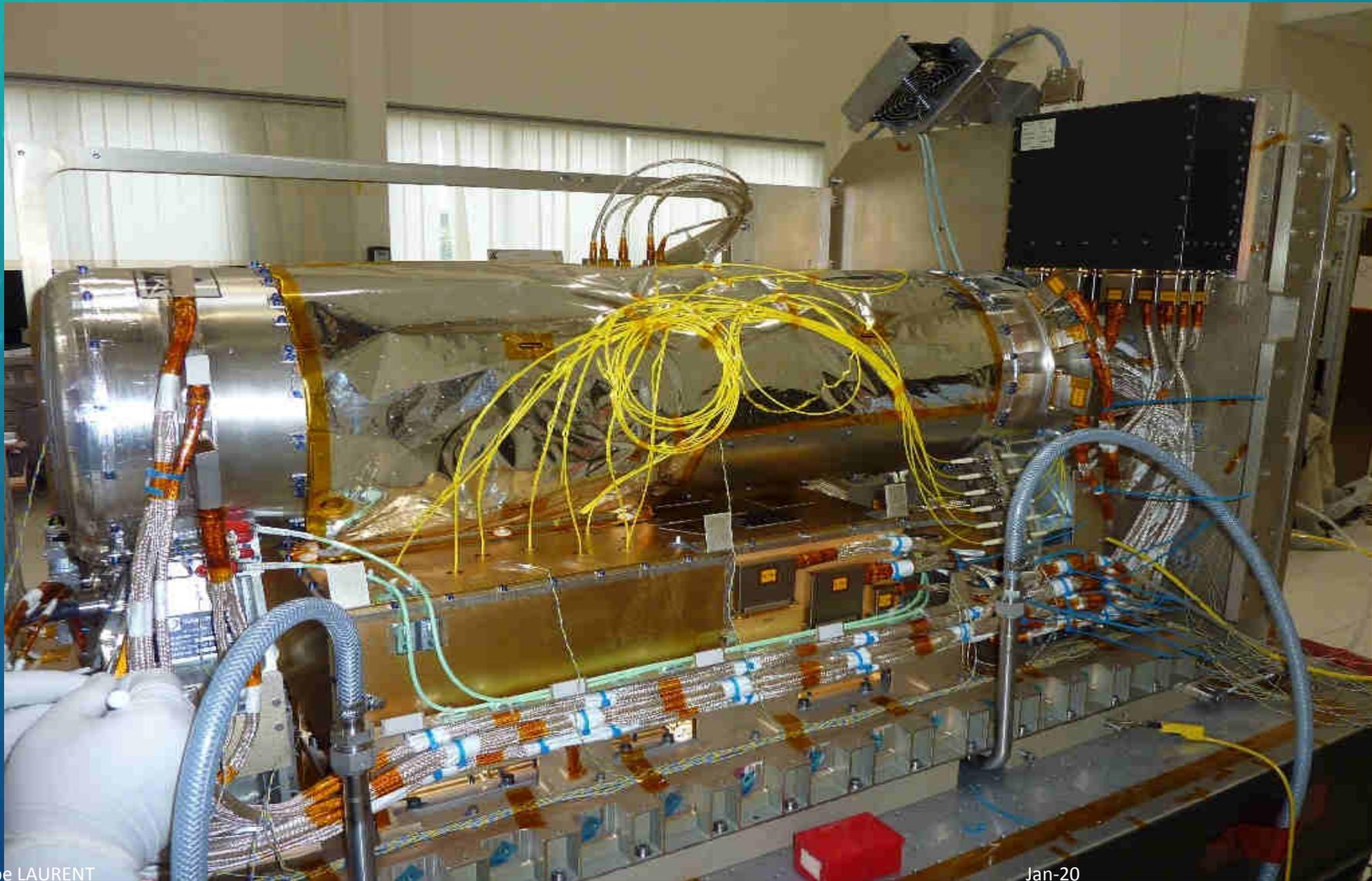
Jan-20

CHARGE UTILE SUR ISS

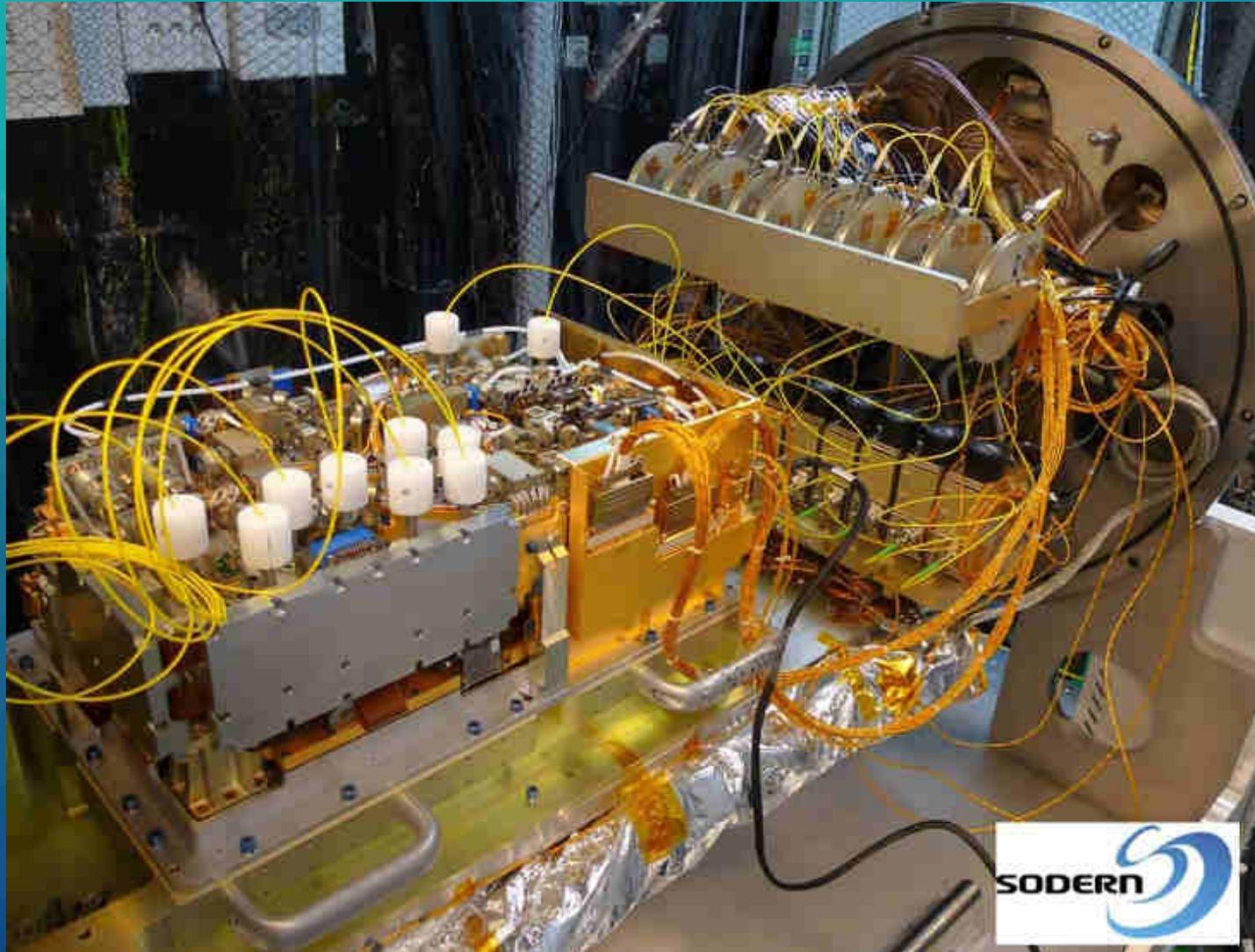


Tube césium, source laser (SODERN)
Source à 9.2 GHz, TAS
Ordinateur (EREMS), logiciel (CS)

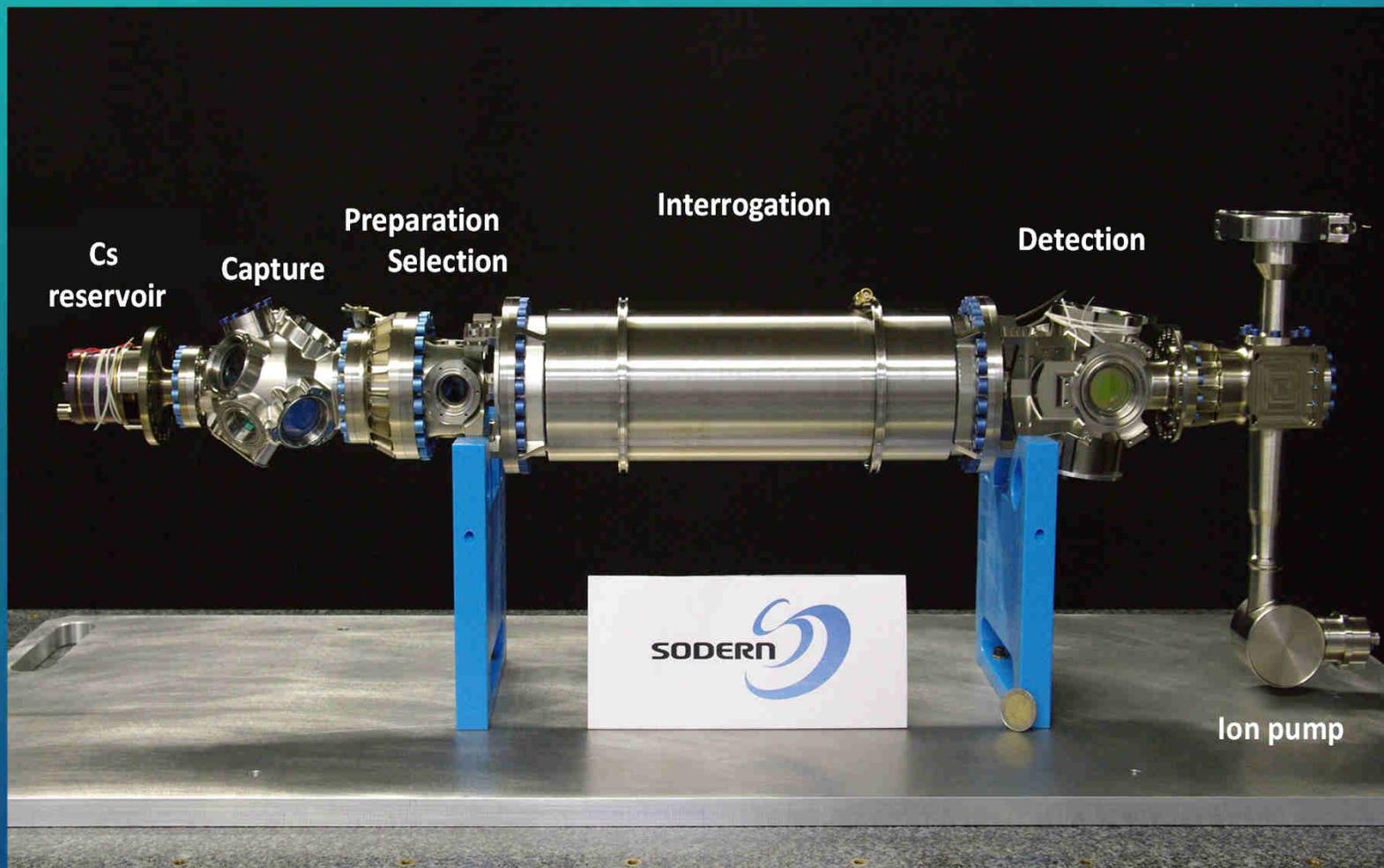
Livré par le CNES, 2014



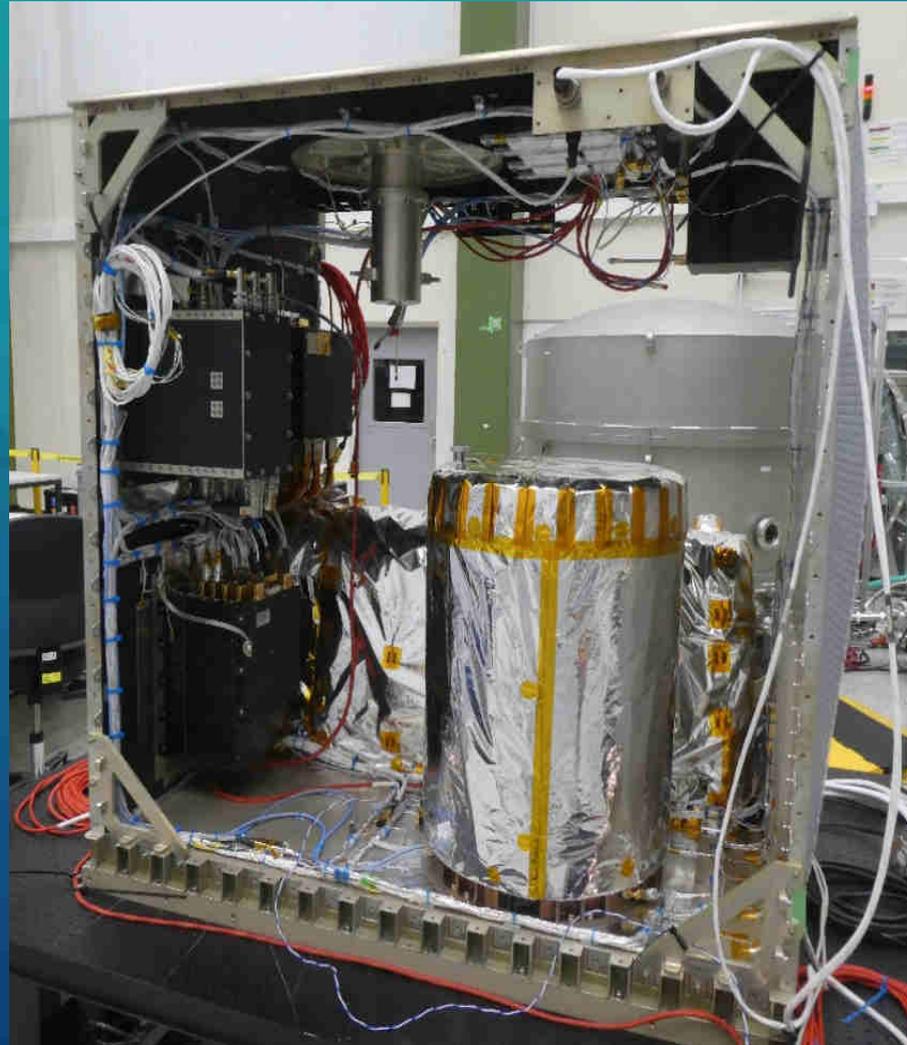
Source laser



Tube à vide pour le césium



INSTRUMENTATION DE VOL EN COURS D'ASSEMBLAGE, AIRBUS (D)



LA MISSION ACES

- Comparaisons entre les meilleures horloges au monde: Cs, Rb, Sr, Yb, Hg,...
- Stabilité des constantes fondamentales
- Mesures du déplacement gravitationnel
- Isotropie de l'espace/temps
- Et plein d'autres choses...

Quand? Nous le saurons cette année.